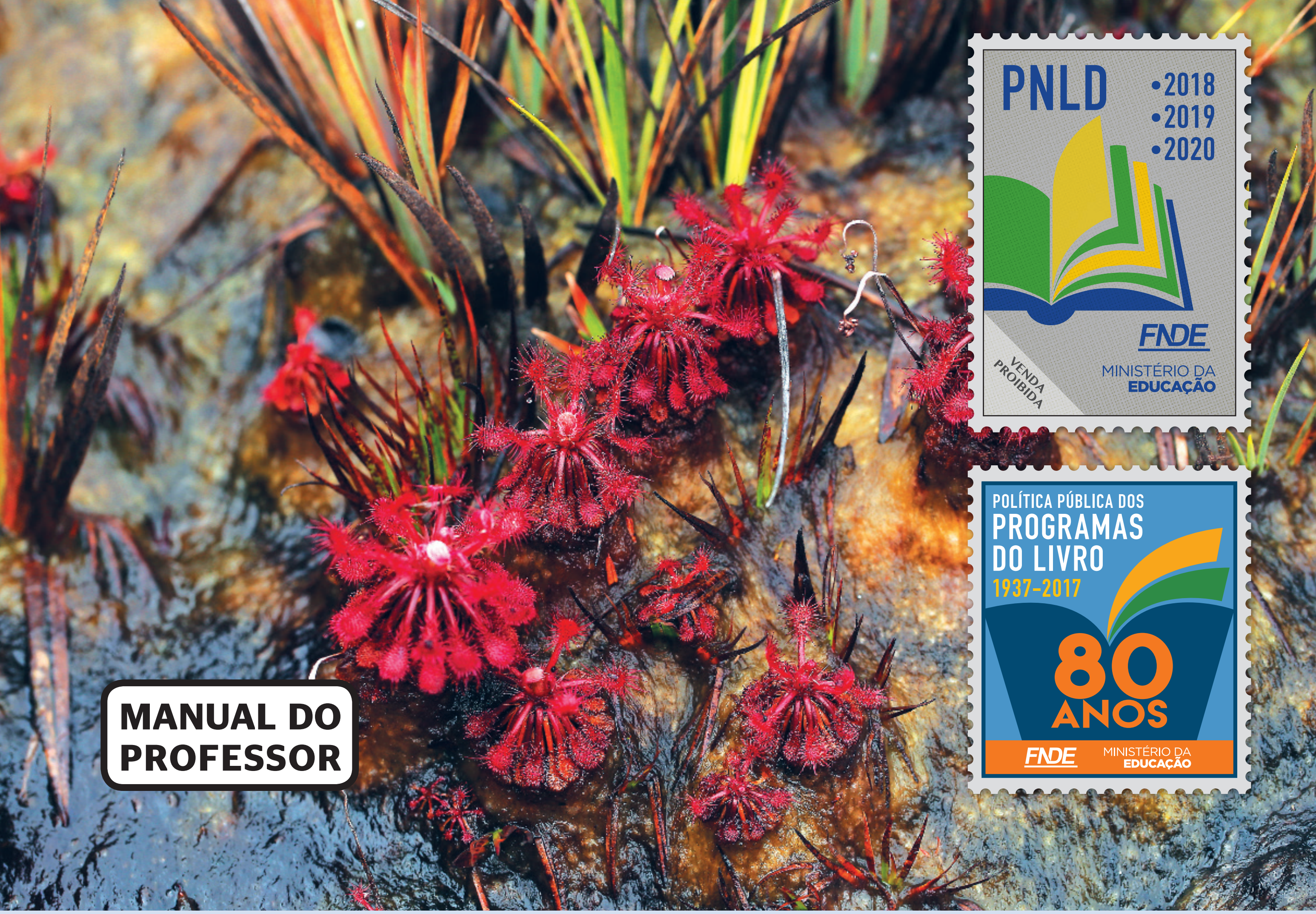


PNLD
•2018
•2019
•2020
FNDE
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
VENDA PROIBIDA

POLÍTICA PÚBLICA DOS
PROGRAMAS
DO LIVRO
1937-2017
80 ANOS
FNDE
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

MANUAL DO PROFESSOR

José Mariano Amabis
Gilberto Rodrigues Martho

Biologia moderna
Amabis & Martho

3
ENSINO MÉDIO

Componente curricular:
BIOLOGIA

MODERNA

Educador,

Este livro que você está recebendo integra o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD). Trata-se de um conteúdo que passou por uma criteriosa avaliação do Ministério da Educação, para disponibilizar às escolas públicas brasileiras um material de qualidade.

É importante lembrar que este livro é reutilizável, ou seja, deve ser recolhido ao final do ano letivo para a utilização no próximo ano até a conclusão do ciclo, no final de 2020. Assim, recomenda-se que seja abordada em sala de aula a importância da conservação do livro para a utilização durante todo o ciclo. No caso deste manual, no caso de mudança do professor, é importante que o material permaneça na escola.

Por fim, caso você identifique alguma inconsistência neste material, ela pode ser comunicada ao FNDE por meio do telefone 0800-616161 ou no contato constante em www.fnde.gov.br/programas/livro-didatico.

Bom trabalho!

FNDE
Fundo Nacional
de Desenvolvimento
da Educação

José Mariano Amabis
Licenciado em Ciências Biológicas pelo Instituto de Biociências –
Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.
Doutor e Mestre em Ciências, na área de Biologia (Genética)
pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo.
Professor do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (1972-2004).
Coordenador de Atividades Educacionais e de Difusão do Centro de Estudos
do Genoma Humano da Universidade de São Paulo (2000-2004).

Gilberto Rodrigues Martho
Licenciado em Ciências Biológicas pelo Instituto de Biociências –
Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.
Lecionou Biologia em escolas de ensino médio e cursos pré-vestibulares.

Biologia moderna
Amabis & Martho

3

Ensino Médio

Componente curricular: BIOLOGIA

MANUAL DO PROFESSOR

1ª edição

São Paulo, 2016

MODERNA

Coordenação editorial: Rita Helena Bröckelmann
Edição de texto: Marcia Maria Laguna de Carvalho (coord.), Flávio Gomes-Silva, Roberta Aparecida Bueno Hiranaka, Dino Santesso Gabrielli, Edna Emiko Nomura, Thiago Macedo de Abreu Hortencio
Preparação de texto: Silvana Cobucci
Gerência de *design* e produção gráfica: Sandra Botelho de Carvalho Homma
Coordenação de produção: Everson de Paula
Suporte administrativo editorial: Maria de Lourdes Rodrigues (coord.)
Coordenação de *design* e projetos visuais: Marta Cerqueira Leite
Projeto gráfico: Marta Cerqueira Leite, Douglas Rodrigues José
Capa: Mariza de Souza Porto
Foto: Planta carnívora endêmica (*Drosera roraimae*). Monte Roraima (RR), 2014.
© Fabio Colombini
Coordenação de arte: Wilson Gazzoni Agostinho
Edição de arte: Ana Miadaira
Edição de infografia: Luiz Iria
Editoração eletrônica: Grapho Editoração
Coordenação de revisão: Adriana Bairrada
Revisão: Afonso N. Lopes, Cecília Setsuko Oku, Maristela S. Carrasco, Thiago Dias, Viviane Teixeira Mendes
Coordenação de pesquisa iconográfica: Luciano Baneza Gabarron
Pesquisa iconográfica: Flávia Aline de Morais, Luciana Vieira
Coordenação de *bureau*: Américo Jesus
Tratamento de imagens: Alexandre Petreca, Everton L. de Oliveira, Fabio N. Precendo, Hélio P. de Souza Filho, Marcio H. Kamoto, Vitória Sousa
Pré-impressão: Alexandre Petreca, Everton L. de Oliveira, Hélio P. de Souza Filho, Marcio H. Kamoto, Vitória Sousa
Coordenação de produção industrial: Viviane Pavani
Impressão e acabamento:

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Amabis, José Mariano
Biologia moderna : Amabis & Martho. – 1. ed. – São Paulo : Moderna, 2016.
Obra em 3v.
Componente curricular: Biologia

Bibliografia
1. Biologia (Ensino médio) I. Martho, Gilberto Rodrigues. II. Título.

16-01478 CCDD-574.07

Índices para catálogo sistemático:
1. Biologia : Estudo e ensino 574.07

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.
Todos os direitos reservados

EDITORA MODERNA LTDA.
Rua Padre Adelino, 758 - Belenzinho
São Paulo - SP - Brasil - CEP 03303-904
Vendas e Atendimento: Tel. (0_ _11) 2602-5510
Fax (0_ _11) 2790-1501
www.moderna.com.br
2016
Impresso no Brasil

1 3 5 7 9 10 8 6 4 2

Apresentação

Prezado estudante,

A ciência está em todas as mídias – TV, jornais e revistas, sem falar da internet – quase diariamente. Os conhecimentos científicos saem dos laboratórios de pesquisa e geram tecnologias cada vez mais surpreendentes. Hoje, todo cidadão bem informado e participante dos avanços sociais de sua época precisa compreender os fundamentos do pensamento científico.

A Biologia é o ramo da ciência dedicado ao estudo e ao entendimento do intrincado fenômeno da vida, em seus mais diversos níveis e manifestações. O que é vida? Quais são suas características fundamentais? De que é feito um ser vivo? Como os seres vivos surgiram e evoluíram? Como a vida se mantém no organismo e se perpetua no tempo? Essas são algumas das perguntas que esta obra propõe analisar e responder, do ponto de vista da ciência atual. Além disso, queremos integrar essas questões centrais da Biologia com suas aplicações em nosso contexto social.

Como encarar esta obra didática de Biologia? Acima de tudo, como uma aliada em sua busca pelo conhecimento. Folheie o livro, familiarize-se com ele: percorra cada página, observe as imagens, procure nele temas que despertam sua curiosidade, antecipe respostas. Temos certeza de que muitos dos assuntos aqui tratados são de seu interesse. Não deixe de ler a apresentação de cada capítulo, que proporciona mais contexto ao seu estudo. Aceite os desafios das atividades. Proponha outras maneiras de divulgar os resultados de suas pesquisas, a fim de propagar informações e ideias. Participe das aulas fazendo sugestões de como gostaria de estudar os variados assuntos. Lembre-se de que você é protagonista do processo de ensino-aprendizagem e percorra seu próprio caminho no conhecimento da Biologia; esta obra quer acompanhar você nessa tarefa.

Além disso, procure sempre ampliar seus horizontes. Estabeleça relações, mesmo que ousadas e inusitadas, entre o que você aprende em Biologia e o conteúdo de outras áreas do conhecimento. Converse com seus professores; troque ideias com colegas. Quanto mais você utilizar seus conhecimentos, em diferentes contextos, mais eles serão proveitosos.

Desejamos que esta obra o ajude a compreender e a valorizar a ciência, considerando os limites e as possibilidades que ela oferece; que desperte seu interesse por temas científicos e, quem sabe, seja seu incentivo para participar dessa grande aventura que é a construção do conhecimento.

Os autores

Organização deste livro

Cada volume da obra está organizado em 3 ou 4 módulos temáticos; em cada um deles, os assuntos são desenvolvidos em 2 a 5 capítulos, acompanhados de atividades que reforçam a aprendizagem.

Conheça detalhadamente a organização interna deste volume.

Módulo 1

Fundamentos da Genética

Conheça os capítulos deste módulo

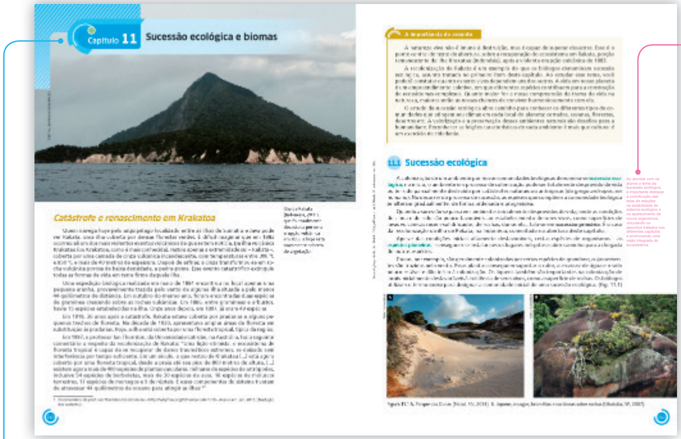
Módulo 3

Fundamentos da Ecologia

Conheça os capítulos deste módulo

Abertura dos módulos

Na abertura de cada módulo, os textos e as imagens trazem informações importantes sobre os assuntos em pauta. Habitue-se a explorar essas páginas iniciais para se inteirar dos temas que serão desenvolvidos em cada capítulo.



Capítulo 11 Sucessão ecológica e biomas

Catástrofe e renascimento em Krakatoa

A importância do assunto

11.1 Sucessão ecológica

Recados em magenta para o professor

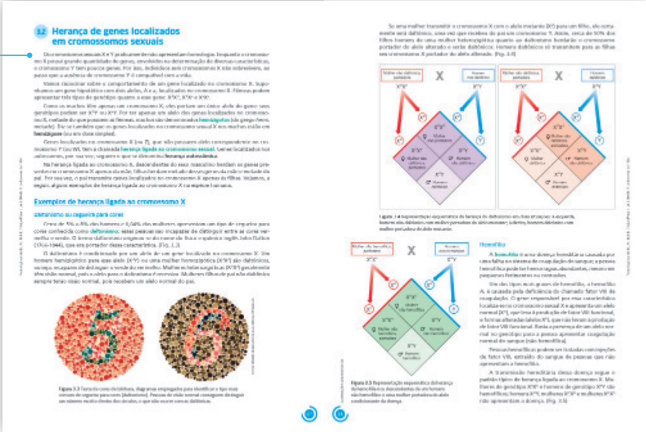
Ao longo do livro e em algumas atividades há alguns recados em magenta, destinados ao docente. O principal objetivo desses recados é sinalizar alguns pontos que merecem maior atenção, trazer sugestões de como conduzir determinada atividade ou de como aproximar o universo dos estudantes ao processo de aprendizagem. Vale ressaltar que orientações mais detalhadas constam do **Suplemento para o professor**.

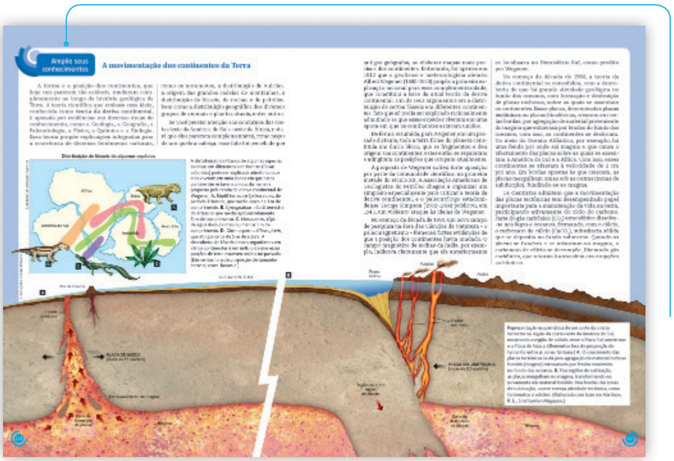
Apresentação dos capítulos

Qual a relação dos assuntos tratados no capítulo com nossa vida?
A *Apresentação* discute justamente as relações entre os conteúdos e questões cotidianas, sociais e de cidadania. Confira os temas de cada capítulo no item *A importância do assunto*.

Textos e imagens

O texto do capítulo é dividido em itens e subitens que organizam os assuntos tratados. Os conceitos mais relevantes estão destacados em verde e outros conceitos importantes estão destacados em preto. As imagens complementam e ilustram o texto. Em seus estudos, explore o "diálogo" entre textos, imagens e legendas explicativas.



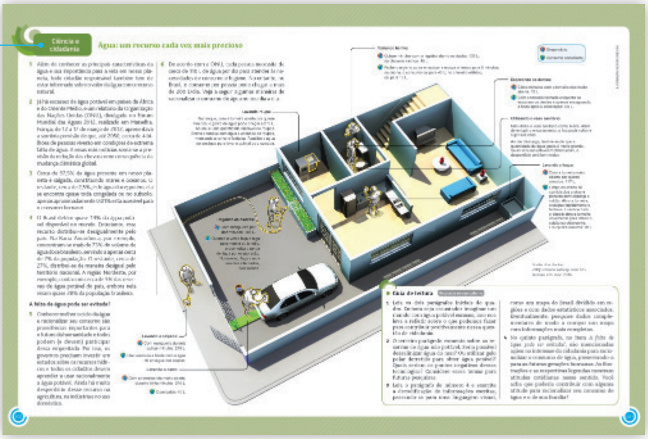


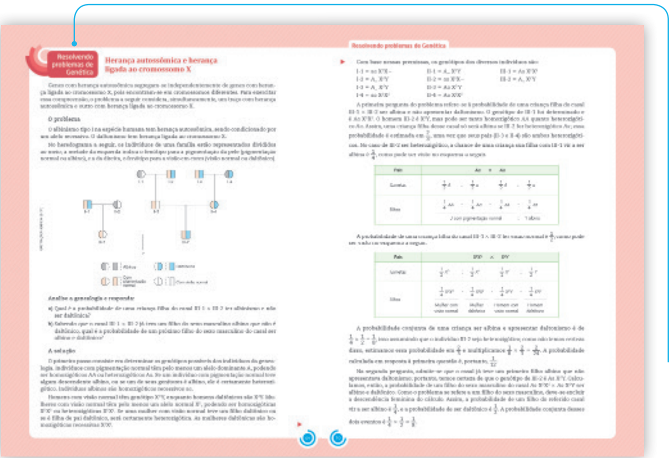
Amplie seus conhecimentos

Presente em alguns capítulos, o quadro *Amplie seus conhecimentos* aprofunda alguns temas e apresenta detalhes e curiosidades relacionados ao assunto em pauta.

Ciência e cidadania

Outro quadro presente em vários capítulos da obra é o *Ciência e cidadania*. Nele, encontram-se assuntos diretamente ligados a questões cotidianas ou de cidadania, destinados a complementar ou a ampliar temas discutidos na *Apresentação* do capítulo. Os parágrafos do texto são numerados em sequência, e um *Guia de leitura* ajuda a explorar o tema central de cada um deles. Habitue-se a responder por escrito, em seu caderno, às sugestões do *Guia*.



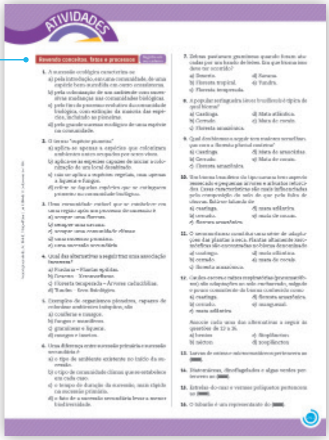


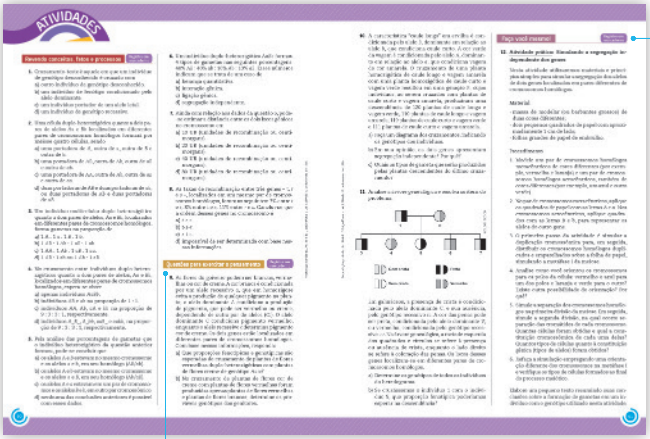
Resolvendo problemas de Genética

Nos capítulos do módulo 1, referentes à Genética, há quadros que trazem, passo a passo, o tipo de organização e raciocínio utilizado na resolução de problemas sobre herança genética. Acompanhe as soluções apresentadas e tente aplicar a mesma estrutura na solução dos problemas propostos nas atividades.

Revendo conceitos, fatos e processos

Esse elenco de atividades contém questões de múltipla escolha, nas quais são revistos conceitos fundamentais do capítulo, relacionando-os a diferentes fatos e situações que ampliam seu significado. Não deixe de explorar essas atividades, anotando as respostas em seu caderno.





Faça você mesmo!

A maioria dos capítulos do livro traz uma ou mais sugestões de atividade intituladas *Faça você mesmo!*. Elas são um convite para realizar alguns “fazeres”, como experimentos, produção de murais, de matérias jornalísticas ilustradas ou de infográficos, entre outros. Muitas dessas atividades destinam-se ao trabalho em grupo. Forme sua equipe.

Questões para exercitar o pensamento

O elenco de atividades denominado *Questões para exercitar o pensamento* traz desafios e orientações para aplicar os conhecimentos aprendidos no capítulo a situações-problema. As diversas sugestões desse bloco demandam respostas que devem ser escritas no caderno. Exercite seu pensamento e aceite os desafios propostos por elas.

A Biologia no vestibular e no Enem

Essas atividades trazem questões selecionadas de exames de ingresso em universidades de diversos estados brasileiros, além de questões do Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) relacionadas aos temas do capítulo.

Sumário

MÓDULO 1 | FUNDAMENTOS DA GENÉTICA ... 10

Capítulo 1 Lei da herança genética 12

A Genética na sociedade contemporânea ... 12
A importância do assunto ... 13
1.1 Mendel e as origens da Genética ... 13
  A ervilha como material experimental, 13
  A análise numérica da descendência, 15
  A dedução da lei da separação dos fatores, 16
  Amplie seus conhecimentos: Teoria das probabilidades aplicada à Genética, 18
1.2 Conceitos básicos em Genética ... 20
  Os conceitos de fenótipo e genótipo, 21
  Exemplos de herança mendeliana, 21
    Herança de um tipo de pelagem em coelhos, 21
    Herança do tipo de folha em cóleo, 22
    Herança mendeliana na espécie humana, 23
  Resolvendo problemas de Genética: Heredogramas e probabilidades, 24
1.3 Variações do modelo mendeliano de herança ... 25
  Alelos letais, 25
  Alelos múltiplos, 26
  Dominância incompleta, 26
  Codominância, 28
  Penetrância e expressividade gênicas, 28
1.4 Herança de grupos sanguíneos na espécie humana ... 30
  Sistema ABO, 30
    Genética do sistema ABO, 30
  Sistema Rh, 31
    Genética do sistema Rh, 31
    Incompatibilidade materno-fetal no sistema Rh, 32
  Ciência e cidadania: Sistema ABO e transfusões sanguíneas, 33
Atividades ... 35

Capítulo 2 As bases cromossômicas da herança 39

Por dentro das "caixas-pretas": o poder da ciência ... 39
A importância do assunto ... 40
2.1 A segregação independente de genes ... 40
  A base celular da segregação independente: meiose, 43
  Resolvendo problemas de Genética: Segregação independente de genes para os grupos sanguíneos ABO e Rh, 44
2.2 Interações entre genes com segregação independente ... 45
  Interação gênica na cor da plumagem de periquitos, 45
  Interação gênica na cor dos olhos de seres humanos, 46
    Como surgem as diferentes cores de olhos?, 46
    Genes envolvidos na determinação da cor dos olhos, 47
  Interação gênica na forma da crista de galináceos, 48
  Interação gênica na cor da pelagem de cães labradores, 50
  Herança quantitativa ou poligênica, 52
    Um exemplo de herança quantitativa, 52
  Resolvendo problemas de Genética: Herança quantitativa, 54
2.3 Genes localizados no mesmo cromossomo ... 55
  Explicando a recombinação pela permutação, 57
  Estimando a taxa de recombinação entre dois locos gênicos, 57
  Princípios de construção dos mapas gênicos, 58
    Unidade de distância nos mapas gênicos, 59
  Resolvendo problemas de Genética: Ligação gênica e mapeamento cromossômico, 59
Atividades ... 60

Capítulo 3 Herança e sexo 63

De novo o sexo... ... 63
A importância do assunto ... 64
3.1 Os cromossomos e o sexo ... 64
  Principais sistemas cromossômicos de determinação do sexo, 64
    Sistema XY, 64
    Sistema X0 e sistema ZW, 65
  Cromossomos sexuais e determinação do sexo, 65
3.2 Herança de genes localizados em cromossomos sexuais ... 67
  Exemplos de herança ligada ao cromossomo X, 67
    Daltonismo ou cegueira para cores, 67
    Hemofilia, 68
  Resolvendo problemas de Genética: Herança autossômica e herança ligada ao cromossomo X, 69
  A hipótese da compensação de dose, 71
  Herança ligada ao cromossomo sexual em aves, 72
Atividades ... 73

Capítulo 4 Genética e biotecnologia na atualidade 76

A manipulação dos genes ... 76
A importância do assunto ... 77
4.1 O controvertido conceito de gene ... 77
  Os limites de um gene, 77
  Diferença entre genes bacterianos e genes eucarióticos, 78
    Splicing genético: corte e emenda do RNA, 79
4.2 Melhoramento genético ... 79
  Heterose ou vigor híbrido, 80
  Problemas decorrentes do melhoramento genético, 81
4.3 Engenharia Genética ... 81
  "Tesouras" moleculares: endonucleases de restrição, 82
    Separação eletroforética de fragmentos de DNA, 83
  Ciência e cidadania: A identificação de pessoas pelo DNA, 84
4.4 Clonagem do DNA ... 86
  Plasmídios como vetores de clonagem de DNA, 86
  Bacteriófagos como vetores de clonagem de DNA, 87
  Bactérias como "fábricas" de proteínas humanas, 88

4.5 Misturando genes entre espécies: transgênicos 88
Como são produzidos animais transgênicos?, 89
Transgênicos entre animais e plantas, 90
4.6 Desvendando o genoma humano 91
O Projeto Genoma Humano, 91
Ciência e cidadania: Mais difícil do que o imaginado, 93
Atividades 95

MÓDULO 2 | A EVOLUÇÃO BIOLÓGICA 100

Capítulo 5 **Os fundamentos da evolução biológica** 102
Mitos de criação 102
A importância do assunto 103
5.1 O pensamento evolucionista 103
Ideias evolucionistas de Lamarck, 104
Ideias evolucionistas de Darwin, 105
O conceito darwiniano de seleção natural, 108
A essência do darwinismo, 110
5.2 Evidências da evolução biológica 110
O documentário fóssil como evidência da evolução biológica, 110
Tipos de fossilização, 111
Determinação da idade dos fósseis, 113
Anatomia Comparada como evidência da evolução biológica, 115
Semelhanças genéticas como evidências da evolução biológica, 117
5.3 A teoria sintética da evolução 119
Principais fatores evolutivos, 119
Mutação gênica, 119
Recombinação gênica, 120
Seleção natural, 121
Ciência e cidadania: Resistência a drogas e seleção natural, 122
Ciência e cidadania: Médicos identificam superbactéria inédita em paciente brasileiro, 124
5.4 Adaptação e evolução 125
Melanismo industrial como exemplo de adaptação evolutiva, 125
Camuflagem, coloração de aviso e mimetismo, 126
Mimetismo batesiano e mimetismo mülleriano, 128
Amplie seus conhecimentos: Em pequena escala, a evolução pode ser observada em ação, 129
Atividades 130

Capítulo 6 **A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos** 134
A ciência por trás do evolucionismo 134
A importância do assunto 135
6.1 O processo evolutivo e a diversificação da vida 135
A árvore filogenética, 135
Diversificação da vida: anagênese e cladogênese, 136
Conceito de espécie biológica e especiação, 136
Espécies em formação: o conceito de subespécie, 137
Tipos de isolamento reprodutivo, 138
6.2 A origem dos grandes grupos de seres vivos 139
O tempo geológico, 139
A vida nos mares primitivos, 142
Precursores da vida, 142
A explosão de vida no Cambriano, 144
A conquista do ambiente de terra firme, 144
A expansão da vegetação, 146
Origem dos tetrápodes, 146
Breve história dos anfíbios, 148
Origem e evolução dos répteis, 149
Origem das aves, 151
Origem e evolução dos mamíferos, 151
Breve história dos mamíferos monotremados e marsupiais, 152
Breve história dos mamíferos placentários, 154
Amplie seus conhecimentos: A movimentação dos continentes da Terra, 156
Atividades 158

Capítulo 7 **Evolução humana** 162
A fraude e as lições deixadas pelo homem de Piltdown.. 162
A importância do assunto 163
7.1 Nosso parentesco evolutivo com os grandes macacos 163
Semelhanças e diferenças entre seres humanos e grandes macacos, 165
Comparações anatômicas e fisiológicas, 165
Comparações genéticas, 166
7.2 História evolutiva dos primatas 166
Classificação, origem e diversificação dos primatas, 166
Tendências evolutivas entre os primatas, 169
Primeiro dedo oponível, 170
Visão binocular ou estereoscópica, 170
Vida familiar e cuidado com a prole, 170
7.3 A ancestralidade humana 171
Primeiros representantes da linhagem humana, 171
Os australopitecos, 171
Predecessores dos australopitecos, 172
Tendências adaptativas dos predecessores do gênero *Homo*, 173
Origem e evolução do gênero *Homo*, 174
Emergência e evolução de *Homo erectus*, 175
Os homens de Neandertal, 177
Amplie seus conhecimentos: Estudos moleculares de hominídeos fósseis, 179
A espécie humana moderna: *Homo sapiens sapiens*, 181
Evolução e cultura, 181
Ciência e cidadania: Receita para uma humanidade desracializada, 183
Atividades 186

MÓDULO 3 | FUNDAMENTOS DA ECOLOGIA 190

Capítulo 8 **O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza** 192
Pode-se dizer que vivemos de luz? 192
A importância do assunto 193
8.1 Energia para a vida 193
8.2 Transferências de energia entre seres vivos 194
Teias e cadeias alimentares, 194
Dissipação de energia na teia alimentar, 196
Pirâmides ecológicas, 197
Pirâmides de biomassa e de energia, 198
Pirâmides de números, 199
O conceito de produtividade, 199

8.3 O conceito de ciclo biogeoquímico 200
8.4 Ciclo da água 201
  Ciência e cidadania: Água: um recurso cada vez mais precioso, 202
8.5 Ciclo do carbono 204
8.6 Ciclo do nitrogênio 204
  Ciência e cidadania: Adubação verde, leguminosas e rizóbios, 206
Atividades 208

Capítulo 9 A dinâmica das populações 211

A população humana: quanto ainda vamos crescer? ... 211
A importância do assunto 212
9.1 O que é uma espécie biológica? 212
  Um nome para cada espécie, 213
9.2 Características das populações 214
  O conceito de população, 214
  Densidade populacional, 214
  Taxas populacionais, 215
    Taxas de natalidade e de mortalidade, 216
    Índice de fertilidade, 216
    Crescimento populacional, 217
  Amplie seus conhecimentos: O experimento de Gause com *Tribolium confusum*, 218
9.3 Fatores que regulam o tamanho populacional 218
  Ciência e cidadania: A população humana, 221
Atividades 224

Capítulo 10 Relações ecológicas 227

Novas razões para amar os superpredadores 227
A importância do assunto 228
10.1 Hábitat e nicho ecológico 228
  O princípio da exclusão competitiva de Gause, 228
10.2 Relações ecológicas intraespecíficas 229
  Competição intraespecífica, 230
  Cooperação intraespecífica, 230
    Colônias, 230
    Sociedades, 231
10.3 Relações ecológicas interespecíficas 231
  Competição interespecífica, 231
  Interações tróficas, 231
    Herbivoria, 231
    Predação, 232
    Amplie seus conhecimentos: Um exemplo do papel da predação no equilíbrio ambiental, 232
    Parasitismo, 233
    Parasitoidismo: parasitismo ou predação de longo prazo?, 233
    Plantas parasitas, 233
  Mutualismo, 234
  Comensalismo e inquilinismo, 236
    O conceito de simbiose, 237
  Resumo das relações ecológicas interespecíficas, 237
Atividades 238

Capítulo 11 Sucessão ecológica e biomas 240

Catástrofe e renascimento em Krakatoa 240
A importância do assunto 241
11.1 Sucessão ecológica 241
11.2 Grandes biomas do mundo 243
  O conceito de bioma, 243
  Os grandes biomas do mundo, 244
    Tundra, 246
    Taiga, 247
    Floresta temperada, 247
    Floresta tropical, 248
    Savana, 249
    Pradaria, 250
    Deserto, 250
11.3 Domínios morfoclimáticos e biomas do Brasil 251
  Domínios morfoclimáticos brasileiros, 251
    Domínio Amazônico, 254
    Domínio dos Mares de Morros (ou Domínio Atlântico), 254
    Domínio das Araucárias, 255
    Domínio dos Cerrados, 255
    Domínio das Pradarias, 256
    Domínio das Caatingas, 257
  Principais biomas das áreas de transição, 257
    Floresta de cocais, 257
    Manguezal, 258
    Pantanal Mato-Grossense, 258
11.4 Ecossistemas aquáticos 259
  Ecossistemas marinhos, 259
  Ecossistemas de água doce, 260
Atividades 261

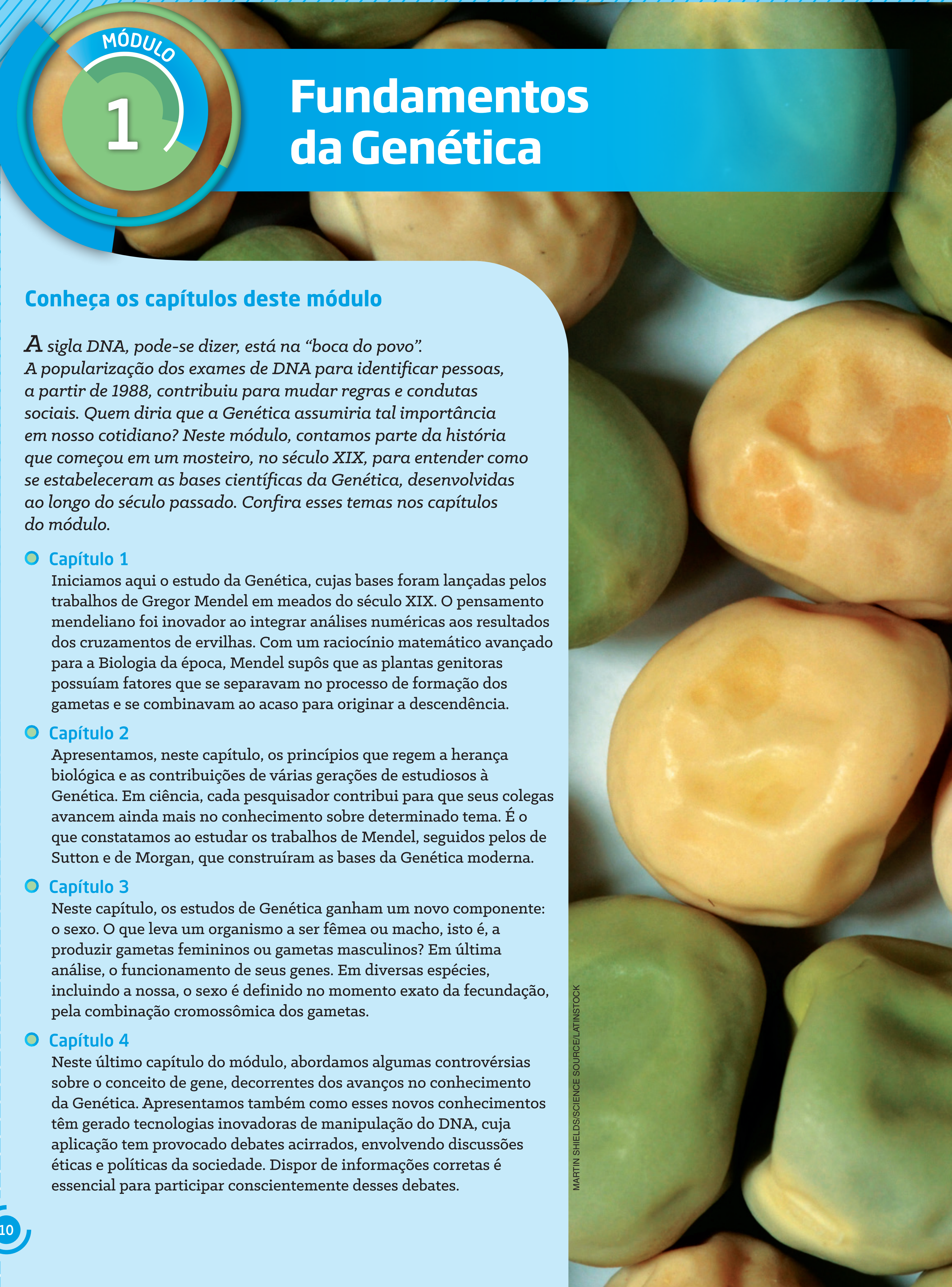
Capítulo 12 A humanidade e o ambiente 263

Por uma humanidade sustentável 263
A importância do assunto 264
12.1 O conceito de desenvolvimento sustentável 264
12.2 Poluição e desequilíbrios ambientais 265
  Poluição ambiental, 265
    Poluição atmosférica, 266
    Inversão térmica, 267
    Aumento do efeito estufa, 268
    Ciência e cidadania: O escudo atmosférico de gás ozônio, 269
    Poluição das águas e do solo, 272
    Amplie seus conhecimentos: Descarte de dejetos humanos, 273
    Concentração de poluentes ao longo das cadeias alimentares, 274
  O problema do lixo urbano, 274
  Desmatamento, espécies exóticas e extinção de espécies, 275
12.3 Alternativas para o futuro 276
  Décadas de 1960 e 1970, 277
  Década de 1980, 277
  Década de 1990, 277
  Década de 2000, 278
  Caminhos e perspectivas para as próximas décadas, 278
    Amplie seus conhecimentos: Alternativas energéticas, 279
    Ciência e cidadania: Sistema de agroflorestas é mais vantajoso na produção de orgânicos, 280
Atividades 282

Lista de siglas 284
Bibliografia 285
Sugestões de livros, *sites* e vídeos 287

MÓDULO 1

Fundamentos da Genética



MARTIN SHIELDS/SCIENCE SOURCE/LATINSTOCK

Conheça os capítulos deste módulo

A sigla DNA, pode-se dizer, está na "boca do povo". A popularização dos exames de DNA para identificar pessoas, a partir de 1988, contribuiu para mudar regras e condutas sociais. Quem diria que a Genética assumiria tal importância em nosso cotidiano? Neste módulo, contamos parte da história que começou em um mosteiro, no século XIX, para entender como se estabeleceram as bases científicas da Genética, desenvolvidas ao longo do século passado. Confira esses temas nos capítulos do módulo.

Capítulo 1

Iniciamos aqui o estudo da Genética, cujas bases foram lançadas pelos trabalhos de Gregor Mendel em meados do século XIX. O pensamento mendeliano foi inovador ao integrar análises numéricas aos resultados dos cruzamentos de ervilhas. Com um raciocínio matemático avançado para a Biologia da época, Mendel supôs que as plantas genitoras possuíam fatores que se separavam no processo de formação dos gametas e se combinavam ao acaso para originar a descendência.

Capítulo 2

Apresentamos, neste capítulo, os princípios que regem a herança biológica e as contribuições de várias gerações de estudiosos à Genética. Em ciência, cada pesquisador contribui para que seus colegas avancem ainda mais no conhecimento sobre determinado tema. É o que constatamos ao estudar os trabalhos de Mendel, seguidos pelos de Sutton e de Morgan, que construíram as bases da Genética moderna.

Capítulo 3

Neste capítulo, os estudos de Genética ganham um novo componente: o sexo. O que leva um organismo a ser fêmea ou macho, isto é, a produzir gametas femininos ou gametas masculinos? Em última análise, o funcionamento de seus genes. Em diversas espécies, incluindo a nossa, o sexo é definido no momento exato da fecundação, pela combinação cromossômica dos gametas.

Capítulo 4

Neste último capítulo do módulo, abordamos algumas controvérsias sobre o conceito de gene, decorrentes dos avanços no conhecimento da Genética. Apresentamos também como esses novos conhecimentos têm gerado tecnologias inovadoras de manipulação do DNA, cuja aplicação tem provocado debates acirrados, envolvendo discussões éticas e políticas da sociedade. Dispor de informações corretas é essencial para participar conscientemente desses debates.

Capítulo 1

MALCOLM GUTTER/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

Lei da herança genética

Itens principais:

- Mendel e as origens da Genética
- Conceitos básicos em Genética
- Variações do modelo mendeliano de herança
- Herança de grupos sanguíneos na espécie humana

Capítulo 2

SCIENCE VU/B. JOHN/VISUALS UNLIMITED/CORBIS/LATINSTOCK

As bases cromossômicas da herança

Itens principais:

- A segregação independente de genes
- Interações entre genes com segregação independente
- Genes localizados no mesmo cromossomo

Capítulo 3

KEN BRATE/SCIENCE SOURCE/FOTOARENA

Herança e sexo

Itens principais:

- Os cromossomos e o sexo
- Herança de genes localizados em cromossomos sexuais

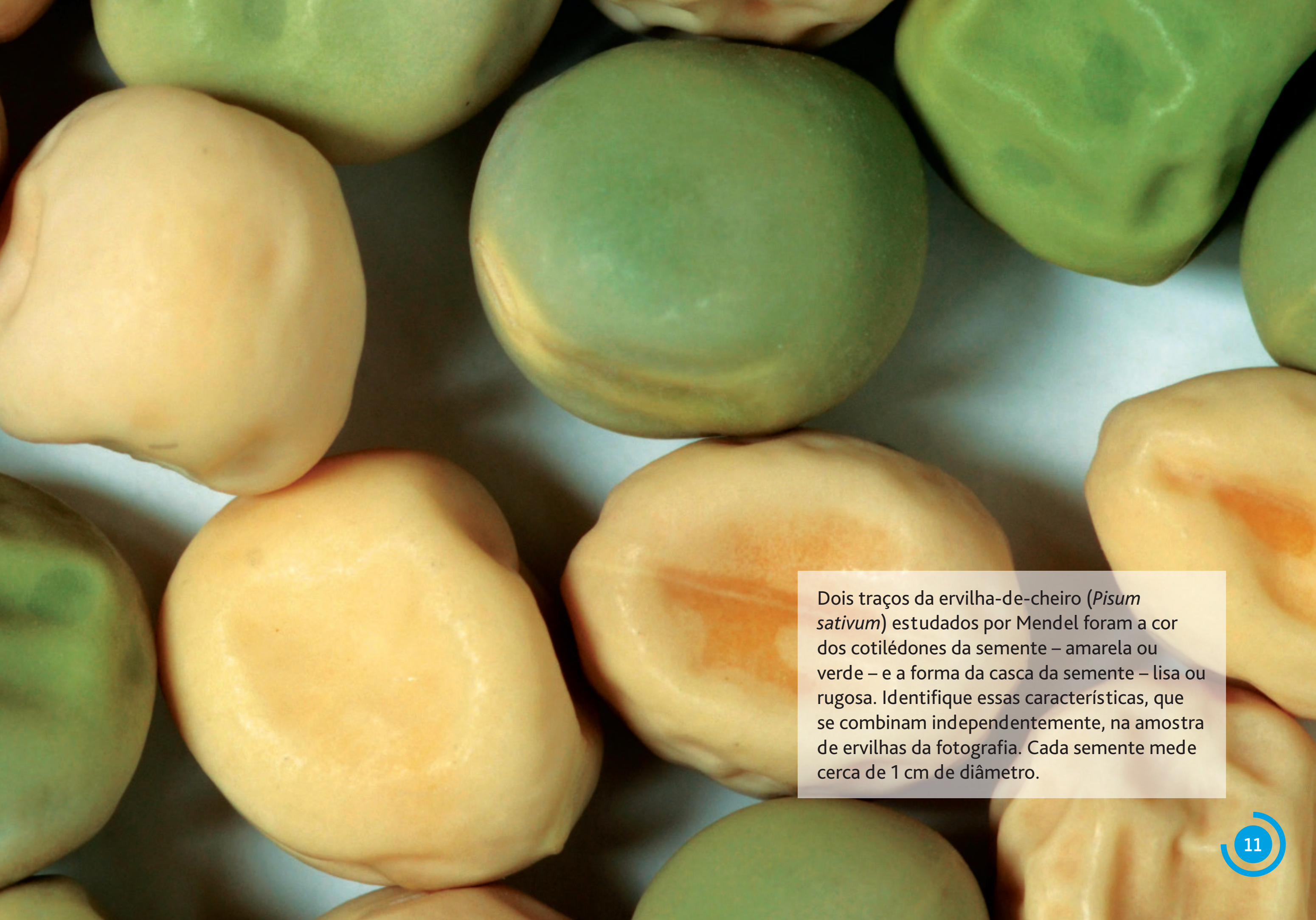
Capítulo 4

VISIONS/DIOMEDIA

Genética e biotecnologia na atualidade

Itens principais:

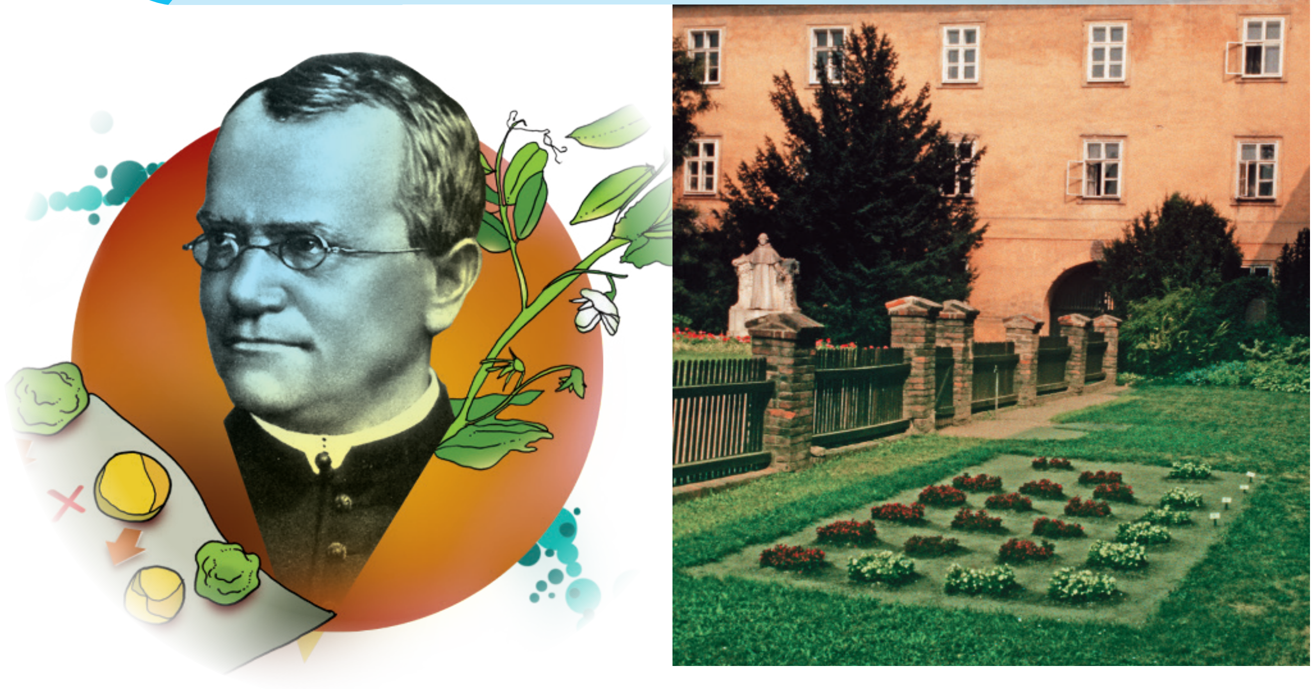
- O controvertido conceito de gene
- Melhoramento genético
- Engenharia Genética
- Clonagem do DNA
- Misturando genes entre espécies: transgênicos
- Desvendando o genoma humano



Dois traços da ervilha-de-cheiro (*Pisum sativum*) estudados por Mendel foram a cor dos cotilédones da semente – amarela ou verde – e a forma da casca da semente – lisa ou rugosa. Identifique essas características, que se combinam independentemente, na amostra de ervilhas da fotografia. Cada semente mede cerca de 1 cm de diâmetro.

Capítulo 1

Lei da herança genética


ALBUM/AKG-IMAGES/LATINSTOCK

MALCOLM GUTTER/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

O monge-cientista Gregor Mendel, retratado à esquerda, realizou, nos jardins de um mosteiro, os experimentos que revolucionaram a Genética. À direita, fotografia desse mosteiro (2007).

A Genética na sociedade contemporânea

O geneticista Sérgio Danilo Pena (1947-), da Universidade Federal de Minas Gerais, foi um dos responsáveis pelo desenvolvimento dos exames de DNA no Brasil, hoje amplamente utilizados na identificação de pessoas. A popularização desses exames, a partir de 1988, contribuiu para reduzir os casos de paternidade duvidosa, mudando regras e condutas na sociedade. Sem falar de suas aplicações na solução de crimes. Quem diria que a Genética assumiria tal importância no cotidiano das pessoas?

E pensar que esse conhecimento científico começou a se desenvolver a partir dos cruzamentos entre ervilhas realizados em meados do século XIX pelo monge-cientista Gregor Mendel em um mosteiro na cidade de Brno (Brünn, em alemão), capital da região da Morávia, parte oriental da atual República Tcheca. A redescoberta dos trabalhos de Mendel, no começo do século XX, marca o início da Genética. Desde então, os conhecimentos sobre a herança biológica não pararam de evoluir.

Em 26 de julho de 2000, os estadunidenses Francis Collins (1950-) e J. Craig Venter (1946-) anunciaram ao mundo a conclusão do sequenciamento do genoma humano. Em outras palavras, eles determinaram a sequência dos mais de 3 bilhões de "letras" químicas que compõem a informação genética de cada ser humano!

Em artigo da revista *Ciência Hoje*[1], o Prof. Danilo Pena resume o que espera da Genética no futuro:

> [...] em 10 anos miraculosos fomos do genoma do *Homo sapiens* ao genoma do *Homo neanderthalensis,* abrindo nesse processo as portas da genômica pessoal e da genômica arqueológica. Certamente os próximos 10 anos vão ser tremendamente estimulantes do ponto de vista genômico. Imagino as maravilhas que virão por aí – mal posso conter minha curiosidade...

---

[1] Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/deriva-genetica/dez-anos-de-genoma-humano>. Acesso em: fev. 2016.

Neste e nos próximos capítulos deste módulo, estudaremos as origens da Genética e veremos como os conhecimentos nessa área chegaram ao ponto em que estão hoje: deixando cientistas e leigos curiosos e maravilhados com o futuro! Aproveite a oportunidade para conhecer um pouco mais sobre esse assunto.

A importância do assunto

A Genética tornou-se mais acessível aos jovens de hoje porque os conhecimentos sobre computadores e informática, que fazem parte do nosso cotidiano, facilitam entender o código que os sistemas vivos utilizam há mais de 3 bilhões de anos na transmissão de informações de geração para geração.

Neste capítulo vamos iniciar o estudo da Genética, um dos ramos mais promissores da Biologia neste século XXI. As bases da Genética foram lançadas pelos trabalhos de Gregor Mendel em meados do século XIX. O pensamento mendeliano foi inovador porque integrou uma análise matemática aos resultados dos cruzamentos de ervilhas.

Na primeira parte do capítulo apresentamos resumidamente os experimentos que levaram Mendel a deduzir a primeira lei da herança. Na segunda parte, mostramos alguns casos em que essa lei se aplica.

É importante estar atento à progressão dos conhecimentos nos estudos de Genética, pois cada etapa é fundamental para o passo seguinte. Além disso, a compreensão dos princípios básicos da herança dos genes contribui para a formação da cidadania, uma vez que a Genética faz parte da vida das pessoas.

1.1 Mendel e as origens da Genética

Genética é a área da Biologia que estuda a **herança biológica** ou **hereditariedade**, que consiste na transmissão de características de pais para filhos, ao longo das gerações. Embora as pessoas devam ter se interessado pela herança biológica desde a Pré-história, os conhecimentos de Genética só se desenvolveram realmente no século XX, a partir da redescoberta das regras básicas da hereditariedade propostas originalmente em 1865 pelo monge e cientista austríaco Gregor Mendel (1822-1884). Além, é claro, do avanço da microscopia e da compreensão do fenômeno da vida no nível microscópico.

De acordo com alguns historiadores, Mendel foi um cientista adiante de seu tempo, pois suas conclusões sobre a herança biológica só foram plenamente compreendidas e reconhecidas pela comunidade científica 35 anos depois de publicadas. Seu trabalho com ervilhas, cujos resultados ajudaram a desvendar as leis fundamentais da herança, é considerado um marco na história da ciência.

A ervilha como material experimental

Quando saiu da cidade de Brno para estudar em Viena, Mendel conheceu as grandes questões a que a Biologia da época tentava responder, entre elas as relacionadas à hereditariedade. Seu conhecimento sobre as técnicas de hibridização em plantas levou-o a considerar a possibilidade de estudar a herança biológica a partir de cruzamentos entre variedades vegetais que diferiam quanto a certas características.

Ao voltar de Viena, Mendel escolheu como material de estudo a ervilha *Pisum sativum*, espécie ornamental utilizada por hibridizadores de plantas em virtude de apresentar algumas características favoráveis, tais como facilidade de cultivo e ciclo de vida curto, que permite a obtenção de várias gerações de plantas em pouco tempo. Além disso, as ervilhas apresentam certas características contrastantes e facilmente identificáveis; por exemplo, a característica “cor das sementes” apresenta-se apenas em duas formas: amarela ou verde, dependendo da linhagem que produz a semente. Esses estados da característica “cor das sementes” não se misturam, e a distinção entre eles é inequívoca.

Ervilhas são plantas da família das leguminosas, com frutos do tipo vagem. A flor da ervilha é hermafrodita, ou seja, apresenta tanto a parte feminina quanto a masculina. As partes reprodutoras masculinas e femininas da flor encontram-se no interior da quilha, uma estrutura fechada, constituída por duas pétalas especiais sobrepostas. A quilha impede a fecundação de uma flor por grãos de pólen provenientes de outras flores; consequentemente, os gametas femininos de uma flor de ervilha são quase sempre fecundados por seus próprios gametas masculinos, processo denominado **autofecundação**.

Para cruzar plantas diferentes é necessário realizar a **fecundação cruzada** por meio da polinização artificial. (Fig. 1.1)

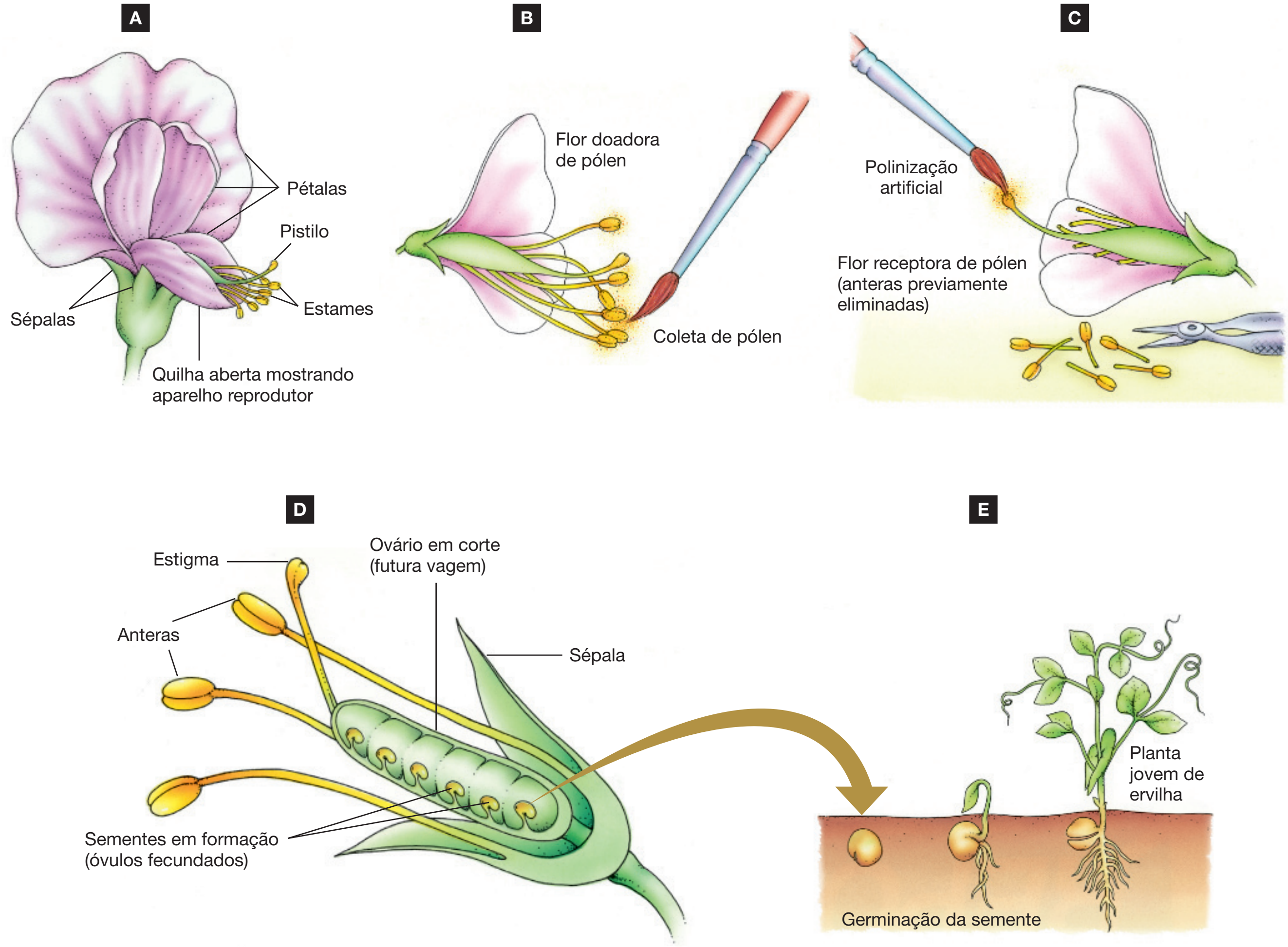

A
Pétalas
Pistilo
Sépalas
Estames
Quilha aberta mostrando aparelho reprodutor
B
Flor doadora de pólen
Coleta de pólen
C
Polinização artificial
Flor receptora de pólen (anteras previamente eliminadas)
D
Estigma
Ovário em corte (futura vagem)
Anteras
Sépala
Sementes em formação (óvulos fecundados)
E
Planta jovem de ervilha
Germinação da semente

Figura 1.1 Representação esquemática da polinização artificial em ervilha. **A.** Flor de ervilha, mostrando suas principais partes; note os estames (porção da parte masculina da flor), em cujas extremidades estão as anteras que contêm os grãos de pólen, portadores dos gametas masculinos, e o pistilo (porção da parte feminina da flor). A base do pistilo é denominada ovário, na qual se formam os óvulos, que contêm os gametas femininos. Durante a reprodução da planta, os óvulos fecundados dão origem às sementes e o ovário desenvolve-se no fruto tipo vagem. **B.** Retirada de pólen da flor doadora com um pincel. **C.** Deposição do pólen sobre o estigma (porção terminal e dilatada do pistilo) da flor receptora, da qual foram removidas as anteras quando ainda imaturas. **D.** Ovário de uma flor cortado longitudinalmente, mostrando os óvulos fecundados transformando-se em sementes (os "grãos" de ervilha). **E.** Etapas da germinação da semente originando uma nova planta. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Mendel concentrou-se em sete características, cada qual com dois estados bem contrastantes, de fácil distinção. Além da cor da semente, Mendel escolheu características como a forma da vagem (inflada ou sulcada), a forma da casca da semente (lisa ou rugosa), a estatura da planta (alta ou baixa), entre outras. (Tab. 1.1)

A análise numérica da descendência

Antes de iniciar um cruzamento, Mendel certificava-se de estar lidando apenas com plantas de **linhagens puras** para cada característica estudada. Para ele, a linhagem era considerada pura quando, por autofecundação, produzia apenas plantas iguais a si mesma. Por exemplo, uma linhagem pura de ervilhas de sementes amarelas origina, quando autofecundada, apenas plantas com sementes amarelas.

Mendel realizou cruzamentos entre plantas puras para cada uma das sete características que escolheu. Em um experimento, ele cruzou plantas puras de sementes amarelas com plantas puras de sementes verdes; em outro, plantas puras altas foram cruzadas com plantas puras baixas; em outro, ainda, plantas puras com flores em posição terminal foram cruzadas com plantas puras com flores em posição axilar; e assim por diante.

Nesses cruzamentos, a geração constituída pelas variedades puras foi denominada geração parental, hoje chamada abreviadamente de **geração P**. A descendência direta da geração P foi chamada de primeira geração híbrida, hoje denominada **geração F_1** (primeira geração de filhos). A descendência resultante da autofecundação da geração F_1 foi denominada segunda geração híbrida ou **geração F_2**.

Mendel observou, em seus cruzamentos, que os descendentes híbridos da geração F_1 eram sempre iguais a um dos pais. Por exemplo, os híbridos originados do cruzamento de plantas puras de sementes amarelas com plantas puras de sementes verdes sempre apresentavam sementes amarelas, idênticas às da planta amarela parental. O estado "cor verde" da semente não estava presente na geração F_1.

Entretanto, a autofecundação de plantas híbridas F_1 produzia uma descendência constituída por plantas com sementes amarelas e plantas com sementes verdes. Isso levou Mendel a concluir que, nas plantas da geração F_1, o estado da característica de um dos progenitores não desaparecia, mas ficava apenas "em recesso", isto é, encoberto, ressurgindo novamente na geração F_2.

Mendel denominou **dominante** o estado da característica que se manifestava nas plantas híbridas e **recessivo** o estado da característica que ficava encoberto. No caso da cor da semente, por exemplo, semente amarela é dominante, e semente verde, recessivo. (Tab. 1.1)

TABELA 1.1 ESTADOS DOMINANTES E RECESSIVOS DAS SETE CARACTERÍSTICAS ESTUDADAS POR MENDEL

Característica	Dominante	Recessivo
Forma da semente	Lisa	Rugosa
Cor dos cotilédones	Amarela	Verde
Cor do tegumento da semente	Cinza	Branca
Forma da vagem	Inflada	Sulcada
Cor da vagem	Verde	Amarela
Posição das flores	Axilar	Terminal
Altura da planta	Alta	Baixa

Outros pesquisadores, predecessores de Mendel, já haviam observado que certos estados de características da ervilha desapareciam nos híbridos e reapareciam na geração seguinte. Entretanto, a originalidade de Mendel foi aplicar uma visão matemática aos resultados, comparando o número de plantas com o estado dominante e com o estado recessivo de diversas características, na geração F_2. Por exemplo, no cruzamento entre plantas puras de sementes amarelas e plantas puras de sementes verdes, ele obteve em F_2 (resultante da autofecundação de F_1) um total de 8.023 sementes, das quais 6.022 eram amarelas, e 2.001, verdes. Dividindo-se o número de sementes amarelas pelo número de sementes verdes, obtém-se a proporção de aproximadamente 3,01 amarelas para 1 verde (3,01 : 1).

Em outro experimento, em que plantas puras de sementes lisas foram cruzadas com plantas puras de sementes rugosas, Mendel obteve, em F_2, 5.474 sementes lisas e 1.850 sementes rugosas, uma proporção de aproximadamente 2,96 : 1. Os números obtidos nos diferentes experimentos eram sempre próximos a 3 : 1, ou $\frac{3}{4}$ (75%) com o estado dominante para $\frac{1}{4}$ (25%) com o estado recessivo.

A semelhança das proporções entre os estados dominante e recessivo, nas diferentes características estudadas, foi o que levou Mendel a considerar a existência de uma lei geral aplicável à herança das características nas ervilhas. (Tab. 1.2)

TABELA 1.2 RESULTADOS OBTIDOS POR MENDEL EM DUAS GERAÇÕES DE ERVILHAS

Tipos de cruzamento entre plantas "puras"	Características das plantas F_1	Autofecundação de F_1	Plantas F_2	Razão em F_2
1. Forma das sementes Lisa × Rugosa	Sementes lisas	Lisa × Lisa	5.474 lisas 1.850 rugosas	2,96 : 1
2. Cor dos cotilédones Amarela × Verde	Sementes amarelas	Amarela × Amarela	6.022 amarelas 2.001 verdes	3,01 : 1
3. Cor do tegumento das sementes Cinza × Branca	Sementes de tegumento cinza	Cinza × Cinza	705 cinza 224 brancas	3,15 : 1
4. Textura das vagens Inflada × Sulcada	Vagens infladas	Inflada × Inflada	882 infladas 299 sulcadas	2,95 : 1
5. Cor das vagens Verde × Amarela	Vagens verdes	Verde × Verde	428 verdes 152 amarelas	2,82 : 1
6. Posição das flores Axilar × Terminal	Flores axilares	Axilar × Axilar	651 axilares 207 terminais	3,14 : 1
7. Altura da planta Alta × Anã	Planta alta	Alta × Alta	787 altas 277 anãs	2,84 : 1

A dedução da lei da separação dos fatores

Para explicar o "encobrimento" do estado recessivo de uma característica na geração F_1 e seu reaparecimento em F_2, Mendel elaborou uma hipótese baseada nas seguintes premissas: **a)** cada característica hereditária é determinada por dois fatores, um herdado do genitor materno e outro do paterno; **b)** os fatores de cada par separam-se (os geneticistas utilizam o termo "segregam-se") no momento da formação dos gametas.

Segundo Mendel, um indivíduo puro para determinada característica recebe dois fatores idênticos dos pais. Consequentemente, todos os gametas formados por esse indivíduo só poderão conter um tipo de fator para a característica em questão.

Um indivíduo híbrido para determinada característica, por sua vez, recebe fatores diferentes dos pais. Consequentemente, os gametas que esse indivíduo formará serão de dois tipos. Mendel considerou que metade dos gametas conteria o fator para um dos estados da característica, e metade, o fator para o outro.

Vejamos o modelo imaginado por Mendel aplicado a um exemplo. Flores de plantas altas puras recebem pólen de plantas anãs, necessariamente puras, uma vez que esse estado da característica é recessivo. De acordo com o modelo mendeliano, cada gameta feminino formado pelas plantas altas contém apenas o fator para alta estatura, que representaremos pela letra maiúscula *A*. Gametas masculinos formados pelas plantas anãs contêm apenas o fator para baixa estatura, representado pela letra minúscula *a*. O encontro dos gametas dessas plantas origina uma descendência F_1, inteiramente constituída de plantas híbridas, com os dois tipos de fatores (*Aa*). Sendo o fator para estatura alta dominante sobre o fator para estatura baixa, as plantas híbridas de F_1 serão todas altas.

Quando uma planta alta híbrida forma gametas, os fatores para a característica "estatura" separam-se e cada gameta recebe apenas um tipo de fator, nunca os dois juntos. No modelo mendeliano, aproximadamente metade dos gametas femininos produzidos pela planta híbrida conterá o fator para estatura alta (*A*), e a outra metade, o fator para estatura baixa (*a*). O mesmo acontece com os gametas masculinos.

Na autofecundação das plantas híbridas da geração F_1, são possíveis quatro tipos de encontros de gametas:

a) gameta feminino com fator para estatura alta (*A*) é fecundado por gameta masculino com fator para estatura alta (*A*);

b) gameta feminino com fator para estatura alta (*A*) é fecundado por gameta masculino com fator para estatura baixa (*a*);

c) gameta feminino com fator para estatura baixa (*a*) é fecundado por gameta masculino com fator para estatura alta (*A*);

d) gameta feminino com fator para estatura baixa (*a*) é fecundado por gameta masculino com fator para estatura baixa (*a*).

No caso **a)**, formam-se indivíduos altos puros, *AA*; nos casos **b)** e **c)**, formam-se indivíduos altos híbridos *Aa*; no caso **d)**, formam-se descendentes anãos *aa*. Considerando que os quatro tipos de encontro de gametas têm a mesma chance de ocorrer, espera-se que se formem 3 plantas altas (1 pura e 2 híbridas) para cada planta anã. (Fig. 1.2)

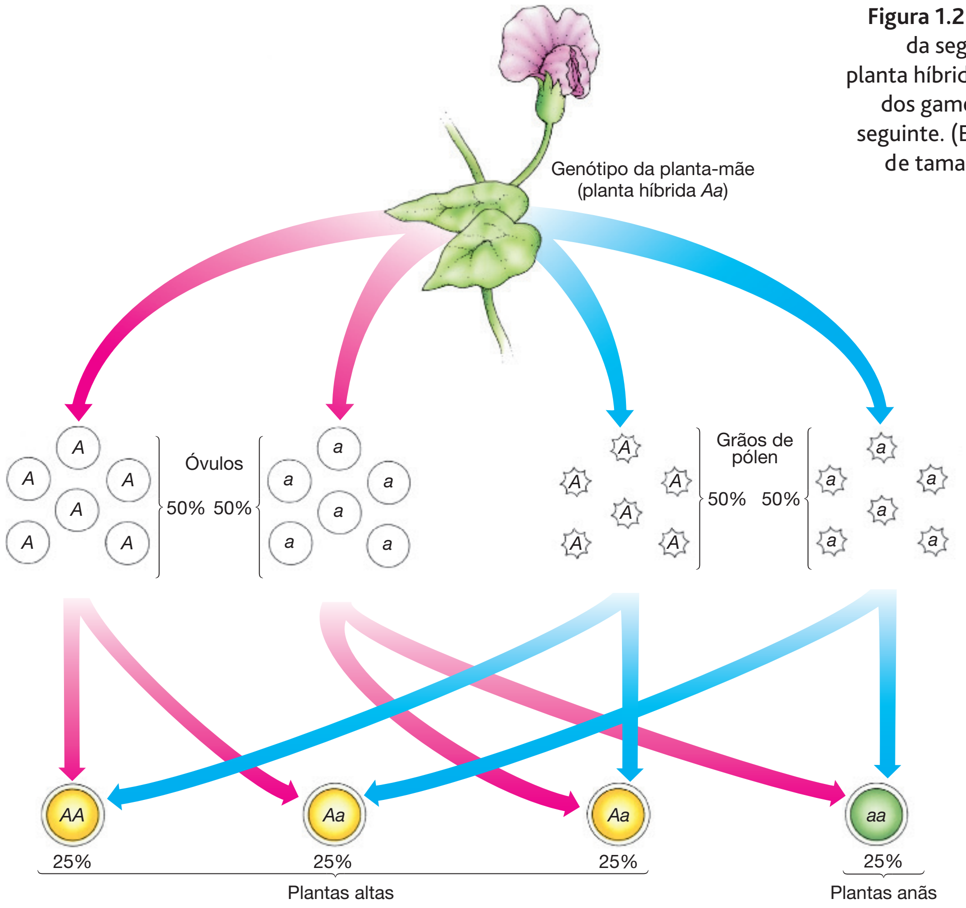


Figura 1.2 Representação esquemática da segregação dos fatores em uma planta híbrida e da combinação aleatória dos gametas na formação da geração seguinte. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

JURANDIR RIBEIRO

O ponto fundamental dessa hipótese proposta por Mendel é a separação dos fatores hereditários durante a formação dos gametas. Esse princípio ficou conhecido como **lei da segregação dos fatores** ou **primeira lei de Mendel**.

Amplie seus conhecimentos

Teoria das probabilidades aplicada à Genética

Um dos motivos de o trabalho de Mendel não ter sido compreendido por seus contemporâneos foi o raciocínio matemático utilizado pelo monge. Os biólogos da época não entendiam as variações em torno da proporção 3 : 1 obtidas nos diversos cruzamentos (reveja a Tab. 1.2). Mendel, por sua vez, tinha plena consciência de que eram variações casuais, perfeitamente explicáveis pela teoria das probabilidades. Realmente, para compreender os resultados obtidos em cruzamentos genéticos, é necessário ter um conhecimento dos princípios básicos da teoria das probabilidades.

Probabilidade é a chance de um determinado evento ocorrer, entre dois ou mais eventos possíveis. Por exemplo, a chance de uma moeda cair com a face "cara" voltada para cima representa um entre dois eventos possíveis, "cara" ou "coroa". Nesse caso, dizemos que a probabilidade de sair "cara" é $\frac{1}{2}$ (uma chance em duas possíveis) ou 50%, pois espera-se que em aproximadamente metade dos lançamentos de uma moeda seja obtida a face "cara".

Eventos aleatórios

A obtenção de "cara" no lançamento de uma moeda, o sorteio de um "ás de ouros" do baralho ou a obtenção de "face 6" no lançamento de um dado são **eventos aleatórios** (do latim *alea*, sorte). Em cada um dos casos, há um conjunto de eventos possíveis, e o evento selecionado ("cara", "ás de ouros" ou "face 6") tem a mesma chance de ocorrer que qualquer outro evento possível naquele conjunto.

Por exemplo, a probabilidade de se obter "cara" no lançamento de uma moeda é $\frac{1}{2}$, pois o conjunto de possibilidades é composto de dois eventos – "cara" ou "coroa" –, com a mesma chance de ocorrer. A probabilidade de se sortear o "ás de ouros" em um baralho é $\frac{1}{52}$, pois o conjunto de possibilidades é formado por 52 cartas, cada uma com igual chance de ser sorteada. A probabilidade de se obter "face 6" ao lançar um dado é $\frac{1}{6}$, que corresponde a um entre seis eventos possíveis.

A probabilidade de um gameta formado por um indivíduo heterozigótico *Aa* portar o alelo *A* ou *a* também é um evento aleatório. O conjunto de possibilidades é formado por dois tipos de eventos: o gameta ser portador do alelo *A* e o gameta ser portador do alelo *a*, ambos com a mesma chance de ocorrer. Portanto, a probabilidade de um gameta de um indivíduo heterozigótico *Aa* portar o alelo *A* ou o alelo *a* é $\frac{1}{2}$ ou 50%.

Eventos independentes

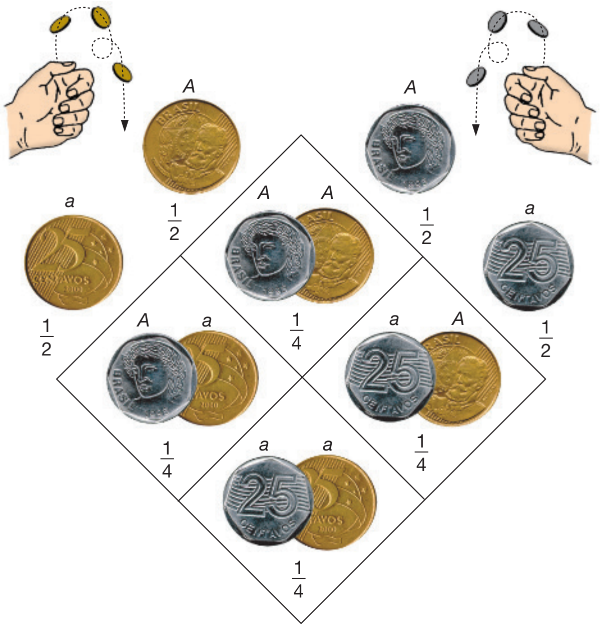
Quando a ocorrência de um evento não afeta a probabilidade de outro evento ocorrer, fala-se em **eventos independentes**. Por exemplo, o fato de se obter "cara" ao lançar uma moeda não aumenta nem diminui a chance de sair "cara" em um novo lançamento da mesma moeda ou de outra moeda qualquer. Assim, o resultado obtido em cada lançamento de moeda é um evento independente. Da mesma maneira, o nascimento de uma criança com determinado genótipo é um evento independente do nascimento de outros filhos de um casal. Por exemplo, mesmo para um casal que já teve cinco filhas, a probabilidade de uma sexta criança ser também do sexo feminino continua a ser $\frac{1}{2}$ ou 50%.

A teoria das probabilidades diz que a probabilidade de dois ou mais eventos independentes ocorrerem conjuntamente é igual ao produto das probabilidades de eles ocorrerem separadamente. Esse princípio é conhecido popularmente como **regra do "e"**, pois corresponde à pergunta: qual é a probabilidade de ocorrer determinado evento **e** também um outro?

Por exemplo, se jogamos uma moeda duas vezes, qual é a probabilidade de obtermos duas vezes a face "cara", ou seja, sair face "cara" no primeiro lançamento e face "cara" também no segundo? A chance de sair "cara" na primeira jogada é $\frac{1}{2}$, e a chance de sair "cara" na segunda jogada também é $\frac{1}{2}$. A probabilidade conjunta de ocorrência desses dois eventos é $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$.

A segregação dos alelos de um gene em um organismo diploide é comparável à obtenção de "cara" ou "coroa" no lançamento de uma moeda. Suponha que o lançamento de uma moeda dourada represente a formação do gameta feminino, que o lançamento de uma moeda prateada represente a formação do gameta masculino, e que "cara" e "coroa" sejam os dois alelos de um gene, *A* e *a*. O resultado da fecundação é comparável à combinação das faces obtidas no lançamento simultâneo das duas moedas.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO
FOTOS: BANCO CENTRAL DO BRASIL



Esquema comparando as probabilidades de obtenção de cara e coroa no lançamento de duas moedas e a formação de diferentes genótipos pela combinação ao acaso de um par de alelos em um cruzamento genético.

Vejamos outro exemplo. Qual é a probabilidade de um casal ter dois filhos do sexo masculino? Uma vez que a probabilidade de uma criança ser do sexo masculino é $\frac{1}{2}$, a probabilidade de o casal ter dois meninos, isto é, de o primeiro filho ser do sexo masculino e o segundo também ser do sexo masculino, é $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$, ou seja, $\frac{1}{4}$.

Eventos mutuamente exclusivos

Outro princípio da teoria das probabilidades diz que a ocorrência de dois eventos mutuamente exclusivos é igual à soma das probabilidades de cada um dos eventos ocorrer isoladamente. Eventos mutuamente exclusivos são aqueles em que a ocorrência de um exclui a ocorrência do outro. Esse princípio é conhecido popularmente como **regra do "ou"**, pois corresponde à pergunta: qual é a probabilidade de ocorrer um determinado evento **ou** outro?

Por exemplo, a probabilidade de se obter "cara" ou "coroa" no lançamento de uma moeda é igual a 1, ou seja, é a probabilidade de sair "cara" somada à probabilidade de sair "coroa" $\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1\right)$. Da mesma forma, a probabilidade de obter-se "face **1**" ou "face **6**" no lançamento de um dado é $\frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{1}{3}$.

Considere agora outra questão: qual é a probabilidade de se obterem "cara" e "coroa" no lançamento de duas moedas? Para responder a essa questão, é preciso levar em conta as duas maneiras de se obterem "cara" e "coroa" quando se lançam duas moedas: pode sair "cara" na primeira moeda e "coroa" na segunda, ou "coroa" na primeira moeda e "cara" na segunda.

Como já vimos, a probabilidade de sair "cara" e "coroa" é $\frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}\right)$; da mesma forma, a probabilidade de sair "coroa" e "cara" é $\frac{1}{4}$. Como esses dois eventos são mutuamente exclusivos, devemos somar suas probabilidades, obtendo a probabilidade final de $\frac{2}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ $\left(\frac{1}{4}\right.$ para "cara" e "coroa" + $\frac{1}{4}$ para "coroa" e "cara"$\left.\right)$.

Raciocínio semelhante é válido para a Genética. Por exemplo, qual é a probabilidade de um casal, tendo dois filhos, um ser menina e o outro menino? Há duas maneiras de um casal ter um menino e uma menina: a primeira criança ser menino, e a segunda, menina $\left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}\right)$, ou a primeira ser menina, e a segunda, menino $\left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}\right)$. Portanto, a probabilidade de o casal ter uma menina e um menino é $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$.

Como exercício, tente calcular a chance de um casal ter duas crianças do sexo masculino e uma do sexo feminino. Pense na ordem em que as três crianças podem nascer e faça os cálculos.

1.2 Conceitos básicos em Genética

A redescoberta dos trabalhos de Mendel e sua aceitação pelos cientistas, no início do século XX, levaram a novas questões. Entre elas: o que são e onde se localizam os fatores hereditários? Que mecanismo biológico é responsável pela separação desses fatores na formação dos gametas?

Em 1902, quando estudava ao microscópio a formação de gametas em gafanhotos, o biólogo estadunidense Walter S. Sutton (1877-1916) percebeu uma surpreendente semelhança entre o comportamento dos cromossomos homólogos, que se separam durante a meiose, e a separação dos fatores hereditários imaginada por Mendel.

Sutton propôs então a hipótese de que os fatores imaginados por Mendel localizavam-se em cromossomos homólogos; com a separação dos homólogos na meiose, ocorreria também a separação (ou segregação) dos fatores mendelianos. Mais ou menos na mesma época, o pesquisador alemão Theodor Boveri (1862-1915) chegou, independentemente, à conclusão de que os fatores mendelianos se localizam nos cromossomos.

Os fatores mendelianos, atualmente denominados **alelos**, são versões diferentes de um **gene**, informações hereditárias inscritas no DNA dos cromossomos. No núcleo de cada uma de nossas células, por exemplo, há 23 tipos de cromossomos, cada um com milhares de genes, totalizando os mais de 20 mil genes presentes em cada célula humana. Cada gene ocupa uma posição definida em um cromossomo a qual é denominada **loco gênico**.

Um gene pode apresentar-se em diferentes versões, denominadas **alelos**. Por exemplo, o fator mendeliano que faz a planta de ervilha ser alta (*A*) é o alelo dominante do gene responsável pela estatura da planta. O fator para a forma anã (*a*) é o alelo recessivo desse mesmo gene. Indivíduos com um par de alelos idênticos (*AA* ou *aa*), que Mendel denominava puros, recebem atualmente a denominação de **homozigóticos**. Indivíduos com um par de alelos diferentes (*Aa*), que Mendel denominava híbridos, são atualmente chamados **heterozigóticos**.

O que chama atenção no trabalho de Mendel é que ele, apoiado apenas no comportamento das características hereditárias, deduziu conceitos relacionados à meiose bem antes da descoberta dos cromossomos e das divisões celulares! Por essa razão, muitos cientistas consideram o monge-cientista um pesquisador inspirado e muito adiante de seu tempo. (Fig. 1.3)

Uma confusão conceitual relativamente frequente é a que ocorre entre os conceitos de gene e de alelo; gene pode ser definido como um segmento de DNA com a "receita" codificada para um RNA; alelo é uma das versões em que aquela receita ocorre na natureza. Por exemplo, quando falamos do "gene do albinismo tipo I", estamos nos referindo a um segmento de DNA envolvido na produção de melanina. A receita "correta" desse gene – o alelo normal – condiciona a produção do pigmento, enquanto uma versão "incorreta" da receita genética – o alelo mutante – é incapaz de atuar na produção de melanina, causando, na condição homozigótica, o albinismo.

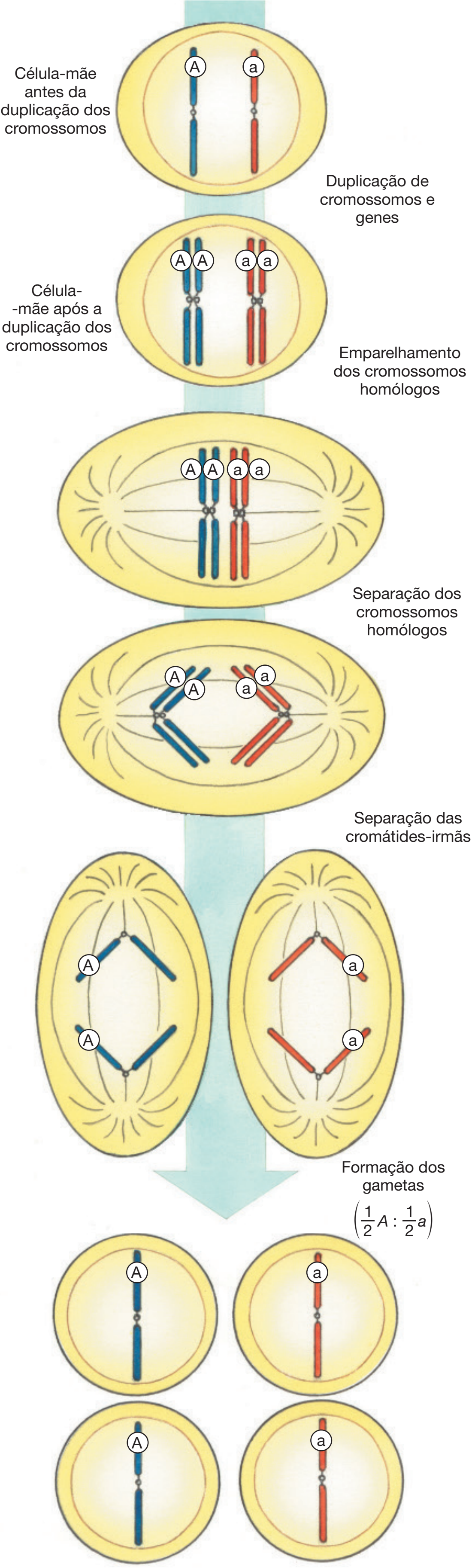

Célula-mãe antes da duplicação dos cromossomos
A
a
Duplicação de cromossomos e genes
A
A
a
a
Célula-mãe após a duplicação dos cromossomos
Emparelhamento dos cromossomos homólogos
A
A
a
a
Separação dos cromossomos homólogos
A
A
a
a
Separação das cromátides-irmãs
A
A
a
a
Formação dos gametas
$\left(\frac{1}{2}A : \frac{1}{2}a\right)$
A
a
A
a

Figura 1.3 Representação esquemática da ideia originalmente proposta por Sutton, em 1902, de que a segregação de um par de alelos resulta da separação dos cromossomos homólogos na meiose. A hipótese de Sutton foi confirmada e passou a constituir um dos fundamentos da Genética. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Os conceitos de fenótipo e genótipo

Os geneticistas utilizam o termo **fenótipo** (do grego *phenos*, evidente, e *typos*, característica) para se referir às características observáveis de um ser vivo, sejam elas físicas, bioquímicas ou comportamentais. O termo **genótipo** (do grego *genos*, origem, e *typos*, característica), por sua vez, designa o conjunto de genes de um indivíduo. Quando falamos da cor das flores de uma planta ou de sua estatura, da cor da pele ou do tipo sanguíneo de uma pessoa, estamos nos referindo ao fenótipo. Por outro lado, quando aludimos à constituição genética de uma planta para ter flores vermelhas ou aos genes responsáveis pelo tipo sanguíneo de uma pessoa, estamos falando do genótipo.

Dois indivíduos, mesmo que tenham genótipos idênticos, podem apresentar diferenças no fenótipo decorrentes de influências ambientais. Por exemplo, pessoas com genótipos idênticos para cor da pele podem ser mais claras ou mais escuras dependendo do tempo de exposição ao sol. O fenótipo de um ser vivo é controlado por genes que apresentam diferentes graus de interação com o ambiente. (Fig. 1.4)

MBI/SHUTTERSTOCK

Figura 1.4 Indivíduos de uma mesma espécie diferem em inúmeras características fenotípicas, muitas das quais refletem suas diferentes constituições genéticas. Na fotografia podem ser vistas diferenças fenotípicas entre indivíduos da espécie humana.

Exemplos de herança mendeliana

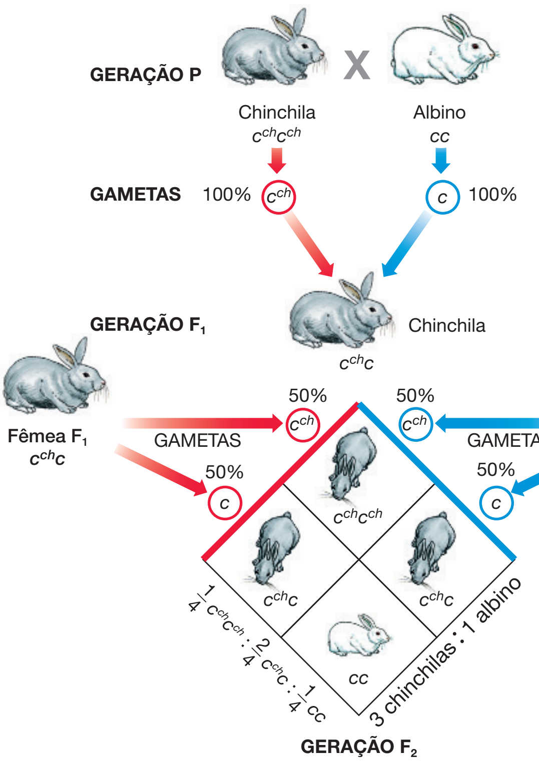
A herança de diversas características em plantas e animais segue o modelo genético proposto por Mendel. Vejamos dois exemplos, a seguir.

Herança de um tipo de pelagem em coelhos

Coelhos da linhagem chinchila apresentam pelagem cinzenta, ao passo que os da linhagem albina apresentam pelagem branca. Quando se cruzam coelhos chinchilas puros com coelhos albinos, a geração F_1 é constituída inteiramente por coelhos de pelagem chinchila, semelhantes a um dos pais. Quando os coelhos chinchilas híbridos da geração F_1 são cruzados entre si, dão origem a uma geração F_2 constituída por 75% $\left(\text{ou } \frac{3}{4}\right)$ de coelhos chinchilas e 25% $\left(\text{ou } \frac{1}{4}\right)$ de coelhos albinos.

Se admitimos que a cor da pelagem é condicionada por um par de alelos, um deles dominante e responsável por pelagem cinzenta, e outro recessivo, responsável por pelagem branca, percebemos que esses resultados estão de acordo com a primeira lei de Mendel. Acompanhe o diagrama do cruzamento na figura a seguir. (Fig. 1.5)

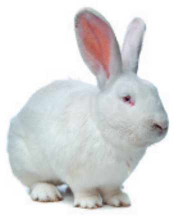
ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA



A dificuldade de muitos estudantes no aprendizado da Genética pode estar na conceituação de certas operações matemáticas envolvendo frações e proporções. Por isso, a integração dos conteúdos iniciais de Genética com os de Matemática pode ser bastante interessante.

STUDIOSMART/ SHUTTERSTOCK

Coelho chinchila


ERIK LAM/SHUTTERSTOCK

Coelho albino

Gametas ♀ / Gametas ♂	$\frac{1}{2}\, c^{ch}$	$\frac{1}{2}\, c$
$\frac{1}{2}\, c^{ch}$	$\frac{1}{4}\, c^{ch}c^{ch}$	$\frac{1}{4}\, c^{ch}c$
$\frac{1}{2}\, c$	$\frac{1}{4}\, c^{ch}c$	$\frac{1}{4}\, cc$

Figura 1.5 Representação esquemática do cruzamento entre coelhos albino e chinchila de linhagens puras e formação das gerações F_1 e F_2. À direita, fotografias de coelhos, evidenciando as pelagens chinchila e albina. Os animais apresentam cerca de 40 cm de comprimento.

O resultado do cruzamento pode ser facilmente visualizado no diagrama. Quanto ao genótipo, formam-se três tipos de descendentes $c^{ch}c^{ch}$, $c^{ch}c$ e cc, respectivamente, nas proporções 1 : 2 : 1 $\left(25\% \text{ ou } \frac{1}{4}\, c^{ch}c^{ch} : 50\% \text{ ou } \frac{2}{4}\, c^{ch}c : 25\% \text{ ou } \frac{1}{4}\, cc\right)$. Quanto ao fenótipo, a descendência esperada é de 3 coelhos cinzentos : 1 coelho branco.

Como é possível determinar se um coelho chinchila resultante desse cruzamento é homozigótico ou heterozigótico?

Uma maneira amplamente utilizada para determinar o genótipo é o **cruzamento-teste**, que consiste em cruzar o indivíduo de fenótipo dominante ($c^{ch}\_\_$) com um indivíduo de fenótipo recessivo, que é certamente homozigótico (cc).

Se, entre os descendentes de um cruzamento-teste, houver tanto indivíduos com fenótipo dominante quanto com fenótipo recessivo, conclui-se que o indivíduo testado é heterozigótico. Se, por outro lado, a descendência é grande e todos os descendentes têm fenótipo dominante, esse é um bom indicativo de que o indivíduo testado é homozigótico.

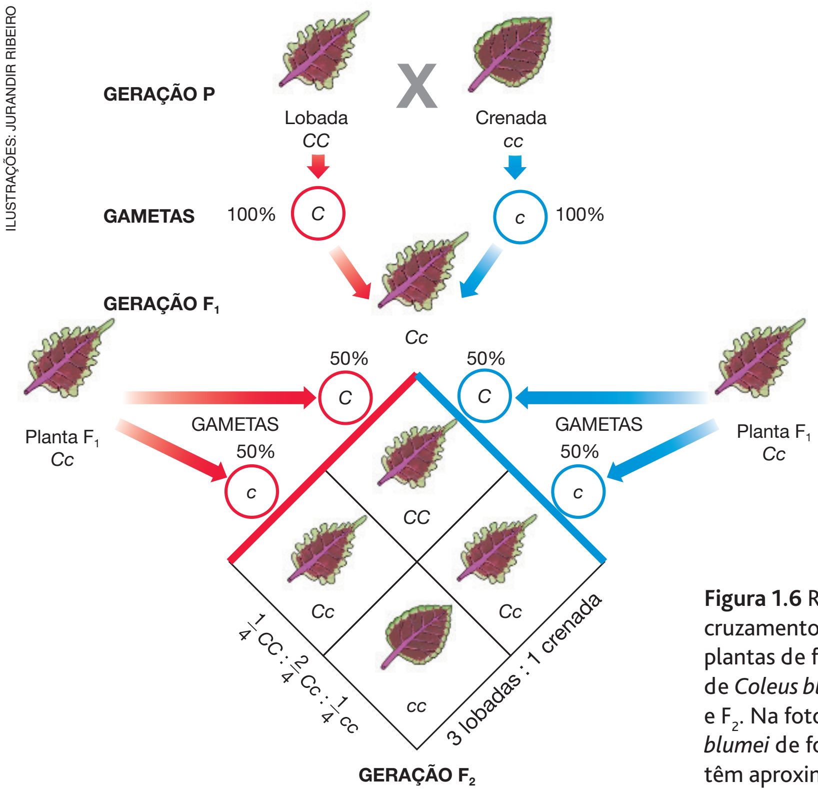
Por exemplo, se cruzarmos um coelho chinchila cujo genótipo pode ser $c^{ch}c^{ch}$ ou $c^{ch}c$ com um coelho albino e surgirem descendentes albinos (cc), teremos certeza de que o parental chinchila é heterozigótico ($c^{ch}c$). Por outro lado, se uma descendência grande é inteiramente constituída de chinchilas, é bem provável que o tipo parental chinchila seja homozigótico $c^{ch}c^{ch}$.

Herança do tipo de folha em cóleo

As folhas da planta ornamental cóleo (*Coleus blumei*) podem ter bordas levemente onduladas (folhas crenadas) ou ter bordas profundamente recortadas (folhas lobadas). Quando plantas puras dessas duas variedades são cruzadas entre si, a geração F_1 é inteiramente constituída por plantas de folhas lobadas. O cruzamento entre plantas da geração F_1 produz uma geração F_2 constituída por 75% $\left(\frac{3}{4}\right)$ de plantas com folhas lobadas e 25% $\left(\text{ou } \frac{1}{4}\right)$ com folhas crenadas, o que corresponde à proporção de 3 lobadas : 1 crenada.

Esses resultados seguem a primeira lei de Mendel, admitindo-se que, nessas variedades, a característica "borda da folha" é condicionada por um gene com duas formas alélicas: o alelo dominante *C* condiciona folha lobada, enquanto o alelo recessivo *c* condiciona folha crenada. (Fig. 1.6)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO


GERAÇÃO P
Lobada
CC
X
Crenada
cc
GAMETAS
100%
C
c
100%
GERAÇÃO F1
Cc
Planta F1
Cc
GAMETAS
50%
C
50%
c
50%
C
GAMETAS
50%
c
Planta F1
Cc
CC
Cc
Cc
cc
1/4 CC : 2/4 Cc : 1/4 cc
3 lobadas : 1 crenada
GERAÇÃO F2

STEFFEN HAUSER/BOTANIKFOTO/ALAMY/GLOW IMAGES

Figura 1.6 Representação esquemática do cruzamento entre plantas de folhas lobadas e plantas de folhas crenadas de linhagens puras de *Coleus blumei* e formação das gerações F_1 e F_2. Na fotografia, plantas da espécie *Coleus blumei* de folhas crenadas. As folhas maiores têm aproximadamente 10 cm de largura.

Herança mendeliana na espécie humana

Na espécie humana, os estudos genéticos não utilizam cruzamentos dirigidos, como se faz com outras espécies. O trabalho do geneticista humano consiste em analisar os membros de uma ou mais famílias nas quais haja portadores do estado da característica em estudo, na tentativa de estabelecer padrões de herança.

As relações de parentesco entre os membros das famílias são representadas por meio de **heredogramas** (do latim *heredium*, herança) ou **árvores genealógicas**, diagramas que facilitam a visualização da transmissão e do comportamento das características hereditárias ao longo das gerações.

Nos heredogramas, indivíduos do sexo masculino costumam ser representados por quadrados, e os do sexo feminino, por círculos. Indivíduos cujo sexo não se conhece são representados por losangos. O casamento, no sentido biológico de procriação, é indicado por um traço horizontal que une os dois membros do casal. Filhos são representados por quadrados, círculos ou losangos unidos por traços verticais ao traço horizontal do casal. (Fig. 1.7)

Para otimizar o trabalho com este conteúdo, sugerimos que os estudantes leiam em casa o item referente aos heredogramas e elaborem um sobre sua família, identificando, se possível, cada pessoa por nome e idade.

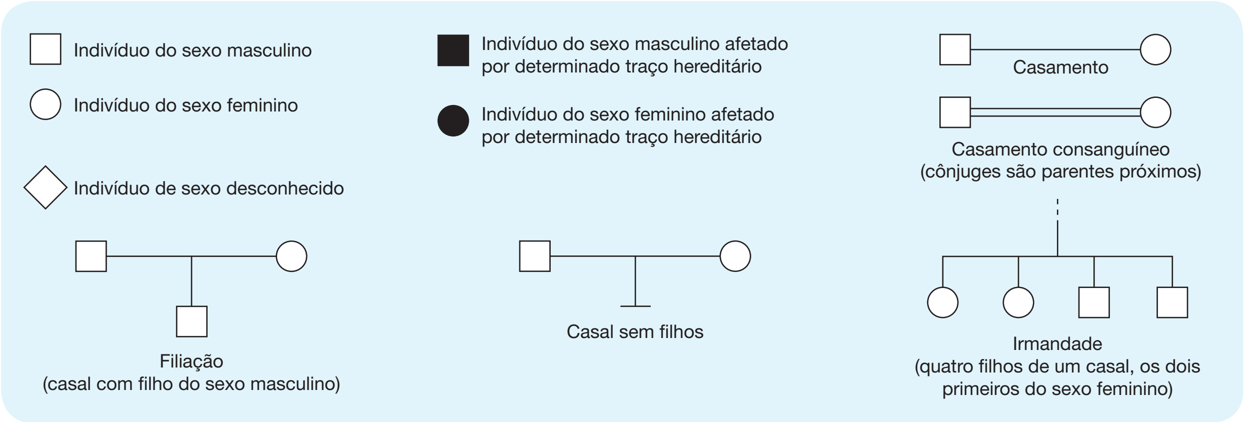

Indivíduo do sexo masculino
Indivíduo do sexo feminino
Indivíduo de sexo desconhecido
Indivíduo do sexo masculino afetado por determinado traço hereditário
Indivíduo do sexo feminino afetado por determinado traço hereditário
Casamento
Casamento consanguíneo (cônjuges são parentes próximos)
Filiação (casal com filho do sexo masculino)
Casal sem filhos
Irmandade (quatro filhos de um casal, os dois primeiros do sexo feminino)
ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Figura 1.7 Simbologia utilizada na construção de heredogramas.

Resolvendo problemas de Genética

Heredogramas e probabilidades

O problema

O albinismo tipo I na espécie humana é condicionado por um alelo recessivo (*a*); pessoas com genótipo *aa* são albinas, com pele, cabelo e olhos muito claros, em virtude da ausência do pigmento melanina. Pessoas com pelo menos um alelo *A* no genótipo (*AA* e *Aa*) têm pigmentação normal.

Pedro tem pigmentação normal na pele, e seus pais também são normais. Sua avó materna e seu avô paterno, porém, são albinos.

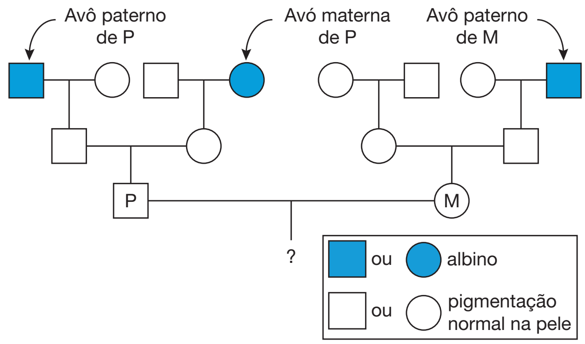
Maria também não é albina e, por parte de mãe, nunca houve, nem na mais remota ancestralidade, algum caso de albinismo. O pai de Maria também é normal, mas seu avô paterno era albino. Pedro e Maria procuram um geneticista para pedir esclarecimentos e aconselhamento genético. O casal tinha as seguintes perguntas:

a) Há alguma chance de termos um filho albino?

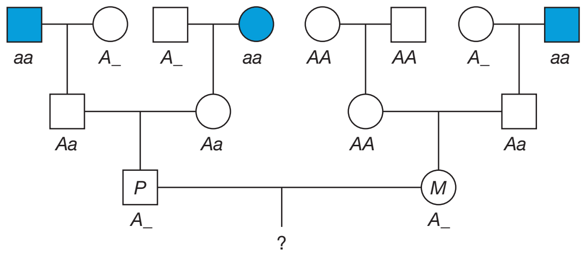
b) Se tivermos um filho albino, qual é a probabilidade de um outro também ser albino?

A solução

O primeiro passo é construir um heredograma para representar as relações entre os familiares.



Em seguida, determinamos os genótipos dos indivíduos.

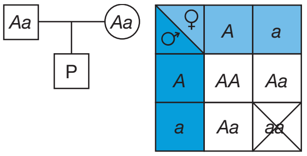


Agora vamos responder à primeira pergunta do problema: há chance de uma criança filha do casal ser albina? Qual é ela?

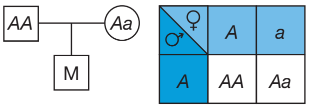
A resposta à primeira parte da pergunta é afirmativa, uma vez que Pedro e Maria podem ser heterozigóticos. Passamos, então, a estimar a probabilidade de ambos serem portadores do alelo para albinismo, pois somente nesse caso eles poderiam ter uma criança albina. Como não são albinos, concluímos que eles são portadores de pelo menos um alelo *A*.

A probabilidade de Pedro ser heterozigótico é $\frac{2}{3}$, pois ele pode ter recebido um alelo *A* do pai e um *a* da mãe, um alelo *a* do pai e um *A* da mãe ou um alelo *A* do pai e um *A* da mãe. Lembre-se de que Pedro não é albino e, portanto, não recebeu o alelo *a* de ambos os pais.

A probabilidade de Maria ser portadora do alelo do albinismo é $\frac{1}{2}$. Isso porque assumimos que o alelo *A* de seu genótipo é proveniente da mãe, supostamente homozigótica *AA*, pois nunca houve em sua ancestralidade caso de albinismo. De seu pai, heterozigótico *Aa*, Maria pode ter recebido o alelo *a* com chance de $\frac{1}{2}$.



♂ \ ♀	*A*	*a*
A	*AA*	*Aa*
a	*Aa*	~~*aa*~~



♂ \ ♀	*A*	*a*
A	*AA*	*Aa*

ADILSON SECCO

Um futuro filho de Pedro e Maria será albino se ocorrerem, simultaneamente, os seguintes eventos:

Evento 1: Pedro ser heterozigótico (probabilidade $= \frac{2}{3}$);

Evento 2: Maria ser heterozigótica (probabilidade $= \frac{1}{2}$);

Evento 3: Pedro e Maria transmitirem o alelo *a* ao filho (probabilidade $= \frac{1}{4}$).

A probabilidade de esses eventos ocorrerem simultaneamente é o produto de suas probabilidades:

$$\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} = \frac{2}{24} = \frac{1}{12}$$

A segunda pergunta do casal acrescenta um dado interessante ao problema. Se Pedro e Maria tiverem efetivamente uma criança albina, as dúvidas sobre seus genótipos deixarão de existir, pois, nesse caso, eles certamente serão heterozigóticos. Assim, o risco de uma próxima criança filha do casal vir a ser albina é $\frac{1}{4}$ ou **25%**.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

1.3 Variações do modelo mendeliano de herança

Nos primeiros anos do século XX, estudos genéticos confirmaram que a herança de diversas características seguia a primeira lei de Mendel. Entretanto, em outras características estudadas, as proporções encontradas na descendência pareciam divergir do esperado. Novas interpretações mostraram, porém, que o modelo mendeliano para a segregação dos fatores continuava válido também nesses casos. Veja alguns exemplos a seguir.

Alelos letais

Em 1905, o biólogo francês Lucien Cuénot (1866-1951) observou que o cruzamento de camundongos de pelagem amarela produzia uma descendência constituída por $\frac{2}{3}$ de indivíduos amarelos e $\frac{1}{3}$ de indivíduos cinzentos (proporção 2 : 1). Por sua vez, cruzamentos de camundongos cinzentos geravam apenas descendentes cinzentos.

Cuénot concluiu que a pelagem cinzenta dos camundongos é condicionada por um alelo recessivo (*A*) e que a pelagem amarela seria condicionada por um alelo dominante (A^Y). Para explicar a proporção 2 : 1, em vez de 3 : 1, ele propôs a hipótese de que o alelo para pelagem amarela seria letal em condição homozigótica, de modo que camundongos portadores do genótipo A^YA^Y morreriam logo no início do desenvolvimento embrionário. Consequentemente, camundongos de pelagem amarela seriam sempre heterozigóticos (A^YA).

A hipótese levantada por Cuénot foi confirmada anos mais tarde, quando outros pesquisadores demonstraram que aproximadamente 25% dos embriões resultantes do cruzamento entre camundongos de pelagem amarela morrem precocemente no útero das fêmeas. (Fig. 1.8)

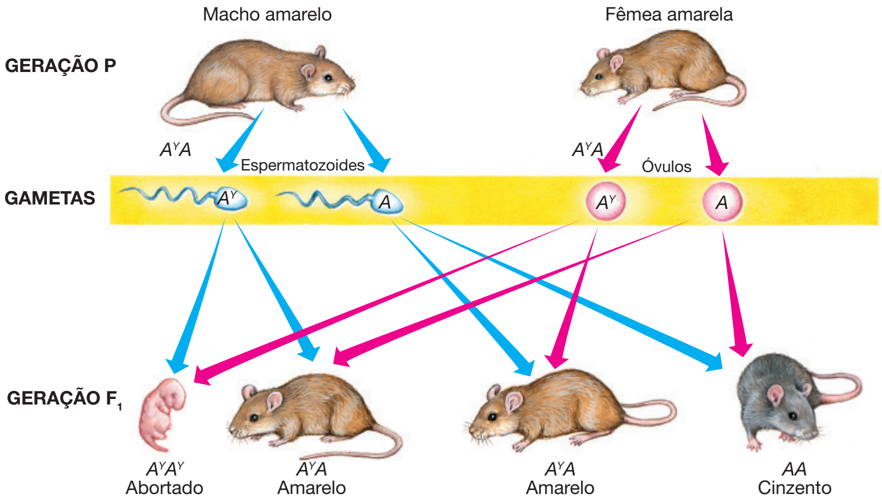


Figura 1.8 Representação esquemática de cruzamentos entre camundongos portadores do alelo A^Y. Indivíduos homozigóticos para esse alelo (A^YA^Y) morrem no início do desenvolvimento embrionário. Assim, a descendência do cruzamento de camundongos amarelos heterozigóticos é constituída por 2 indivíduos amarelos (A^YA) para 1 indivíduo cinzento (*AA*). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Alelos que causam a morte prematura de seus portadores são denominados **alelos letais** e sua presença já foi identificada em diversos organismos. Na espécie humana, por exemplo, estudos sugerem que a **acondroplasia**, uma forma de nanismo, é condicionada por um alelo *D* que, em "dose dupla" (condição homozigótica *DD*), causa a morte do embrião humano ainda no início do desenvolvimento. Pessoas com fenótipo acondroplásico são sempre heterozigóticas *Dd*, enquanto pessoas normais são homozigóticas recessivas *dd*. (Fig. 1.9)

TONY ARRUZA/CORBIS/LATINSTOCK

Figura 1.9 A acondroplasia na espécie humana é condicionada por um alelo dominante que, na condição homozigótica, parece ser letal aos portadores. Na fotografia, portadores de acondroplasia. (República Dominicana, 1988.)

Alelos múltiplos

Outro conceito desenvolvido nos primórdios da Genética foi o de **alelos múltiplos** de um gene. De acordo com esse conceito, um gene pode ocorrer, na população, em três ou mais formas alélicas, embora cada indivíduo diploide sempre apresente apenas dois exemplares de cada gene, um proveniente de cada progenitor.

Um dos primeiros casos estudados de alelos múltiplos foi o do gene para cor de certos tipos de pelagem em coelhos. Esse gene apresenta-se em quatro formas alélicas: C, que determina pelagem castanho-acinzentada (selvagem ou aguti); c^{ch}, que determina pelagem cinza (chinchila); c^{h}, que determina pelagem branca com extremidades escuras (himalaia); c, que condiciona pelagem branca (albina). (Fig. 1.10)

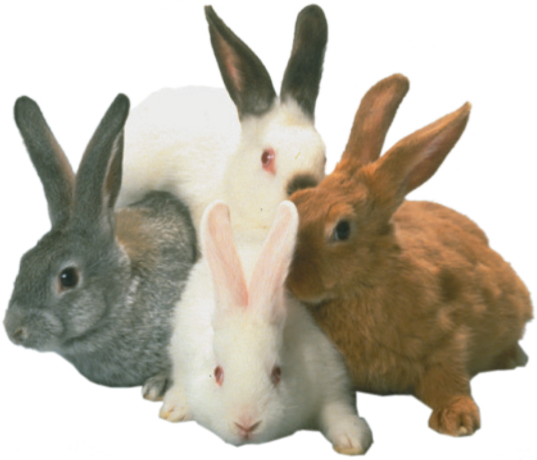

LUIS GOMES/ABRIL COMUNICAÇÕES S/A

Figura 1.10 Quatro tipos de pelagem em coelhos: chinchila, à esquerda; himalaia, atrás; selvagem, à direita; albina, na frente. Os animais apresentam cerca de 40 cm de comprimento.

O alelo C comporta-se como dominante sobre os outros três. O alelo c^{ch}, recessivo em relação a C, comporta-se como dominante sobre c^{h} e sobre c. O alelo c^{h}, por sua vez, é recessivo em relação a C e a c^{ch} e dominante sobre c. Este, finalmente, é recessivo em relação aos outros três alelos. A relação de dominância entre os quatro alelos pode ser representada por: $C > c^{ch} > c^{h} > c$.

Como os alelos ocorrem em pares nos indivíduos, há dez tipos possíveis de genótipos em coelhos quanto a esse gene e quatro tipos de fenótipos. (Tab. 1.3)

TABELA 1.3 GENÓTIPOS E FENÓTIPOS NA COR DA PELAGEM EM COELHOS

Genótipos	Fenótipos
CC, Cc^{ch}, Cc^{h} e Cc	Selvagem
$c^{ch}c^{ch}$, $c^{ch}c^{h}$ e $c^{ch}c$	Chinchila
$c^{h}c^{h}$ e $c^{h}c$	Himalaia
cc	Albino

Dominância incompleta

Os estudos mostraram que, em certos casos, o fenótipo dos indivíduos heterozigóticos é intermediário entre os fenótipos dos dois homozigóticos; nesses casos, fala-se em **dominância incompleta** entre os alelos. Por exemplo, na planta boca-de-leão (*Antirrhinum majus*), indivíduos homozigóticos para um dos alelos de determinado gene têm flores vermelhas, os homozigóticos para o outro alelo têm flores brancas e os heterozigóticos têm flores cor-de-rosa.

A explicação é que um dos alelos do gene para cor da flor funciona normalmente, determinando a síntese de pigmentos, enquanto o outro alelo seria inativo, não determinando a síntese de pigmento. As plantas homozigóticas, que apresentam dois alelos funcionais para a síntese de pigmento vermelho, produzem-no em quantidade tal que as flores têm coloração vermelha intensa. Indivíduos heterozigóticos, em que há apenas um alelo funcional do gene, produzem cerca de metade do pigmento formado pelos homozigóticos, de modo que a cor das pétalas é mais clara, cor-de-rosa. Indivíduos homozigóticos para o alelo não funcional têm flores brancas uma vez que não produzem pigmento.

Na dominância incompleta, os geneticistas costumam representar o gene em questão por uma letra maiúscula acompanhada de um índice que diferencia os alelos. Por exemplo, podemos escolher a letra F para representar o gene responsável pela cor da flor na boca-de-leão, e os índices V e B para indicar os alelos para a cor vermelha – F^{V} – e para a cor branca – F^{B}. Os genótipos dos três tipos de plantas seriam: $F^{V}F^{V}$ (flores vermelhas), $F^{B}F^{B}$ (flores brancas) e $F^{B}F^{V}$ (flores cor-de-rosa). (Fig. 1.11)

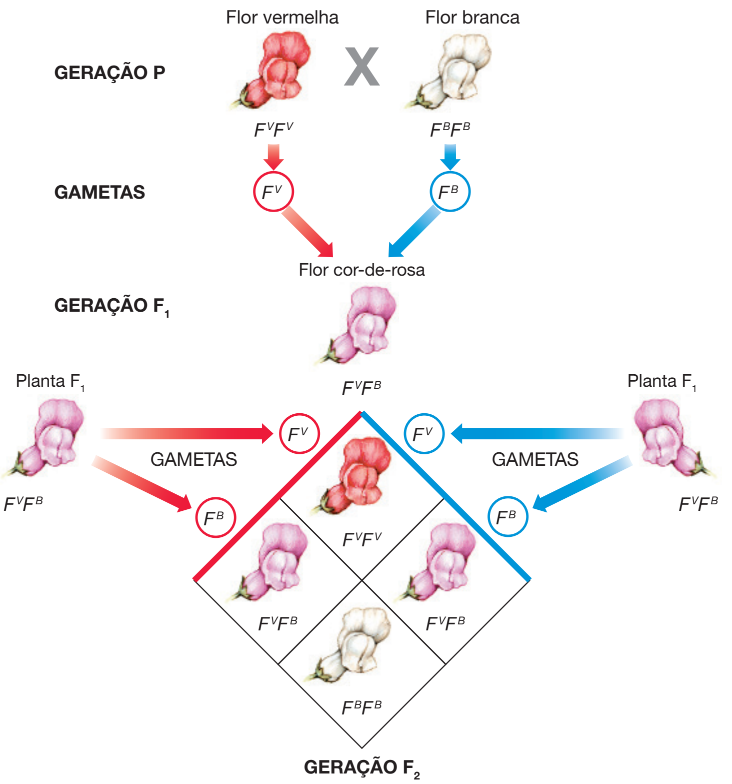

Flor vermelha
Flor branca
GERAÇÃO P
X
F^VF^V
F^BF^B
GAMETAS
F^V
F^B
Flor cor-de-rosa
GERAÇÃO F_1
F^VF^B
Planta F_1
Planta F_1
GAMETAS
GAMETAS
F^VF^B
F^VF^B
F^V
F^B
F^V
F^B
F^VF^V
F^VF^B
F^VF^B
F^BF^B
GERAÇÃO F_2

Figura 1.11 Representação esquemática do cruzamento entre plantas boca-de-leão (*Antirrhinum majus*). Os indivíduos heterozigóticos têm fenótipo intermediário entre os fenótipos dos parentais homozigóticos.

Outro exemplo de dominância incompleta é a cor da plumagem das galinhas da variedade andaluza, em que aves homozigóticas P^PP^P têm plumagem preta, aves homozigóticas P^BP^B têm plumagem branca e aves heterozigóticas (P^PP^B) têm plumagem cinza-azulada. (Fig. 1.12)

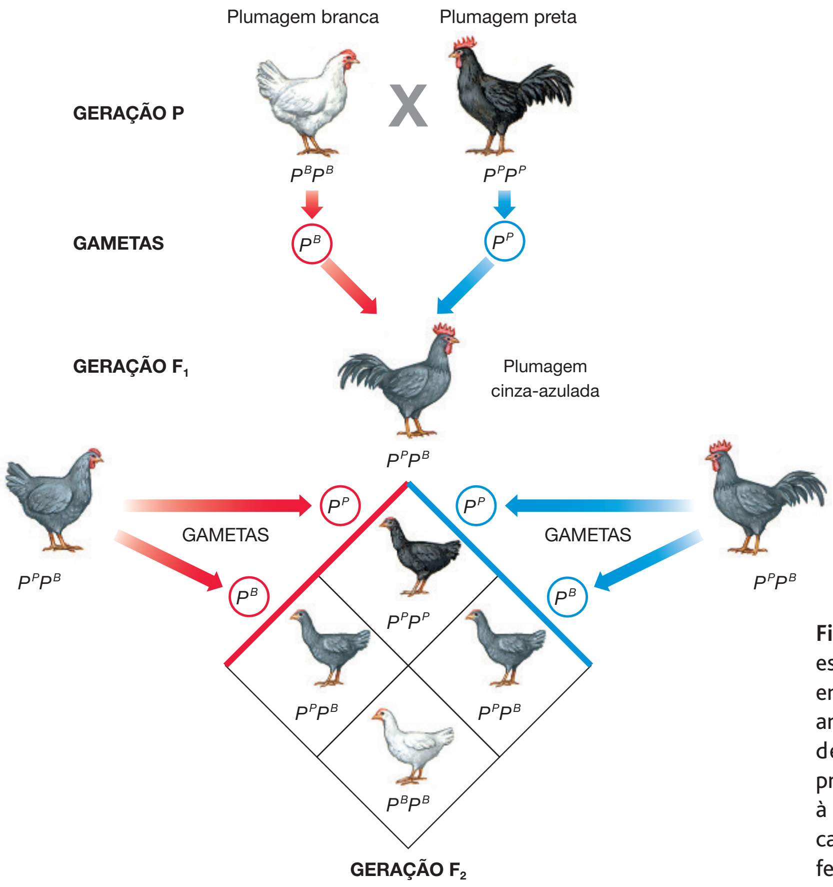

Plumagem branca
Plumagem preta
GERAÇÃO P
X
P^BP^B
P^PP^P
GAMETAS
P^B
P^P
GERAÇÃO F_1
Plumagem cinza-azulada
P^PP^B
GAMETAS
GAMETAS
P^PP^B
P^PP^B
P^P
P^B
P^P
P^B
P^PP^P
P^PP^B
P^PP^B
P^BP^B
GERAÇÃO F_2

Figura 1.12 Representação esquemática do cruzamento entre galináceos da raça andaluza. Note que, em casos de dominância incompleta, a proporção genotípica é igual à proporção fenotípica, pois cada genótipo manifesta um fenótipo distinto.

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Codominância

Há casos em que indivíduos heterozigóticos para determinado gene expressam, simultaneamente, os fenótipos dos dois tipos de indivíduos homozigóticos, fenômeno que os geneticistas denominam **codominância**. Isso ocorre porque os dois alelos do gene são funcionais, de modo que o indivíduo heterozigótico, possuindo os produtos de ambos os alelos, apresenta as características dos homozigóticos para cada alelo. (Tab. 1.4)

TABELA 1.4 RELAÇÃO DE DOMINÂNCIA ENTRE ALELOS DE UM GENE

Tipo de relação	Características
Dominância completa	Os indivíduos heterozigóticos apresentam o mesmo fenótipo que um dos homozigóticos.
Dominância incompleta	Os indivíduos heterozigóticos apresentam fenótipo intermediário entre o dos homozigóticos.
Codominância	Os indivíduos heterozigóticos apresentam ambos os fenótipos dos homozigóticos.

Na espécie humana, o sistema MN de grupos sanguíneos é um caso de alelos codominantes. Nesse sistema, há três fenótipos, denominados M, N e MN, condicionados por dois alelos de um gene, Ag^M e Ag^N. O alelo Ag^M determina a presença de uma substância imunogênica na membrana das hemácias, o aglutinogênio M, enquanto o alelo Ag^N determina a presença do aglutinogênio N. Substância imunogênica é qualquer substância capaz de induzir a formação de anticorpos contra si em indivíduos que não a possuem. Substâncias imunogênicas de hemácias são denominadas aglutinogênios, pois, ao reagir com anticorpos específicos, denominados aglutininas, provocam a aglutinação das hemácias.

Pessoas homozigóticas Ag^MAg^M apresentam apenas o aglutinogênio M nas hemácias, pertencendo ao grupo sanguíneo M. Pessoas homozigóticas Ag^NAg^N apresentam apenas o aglutinogênio N nas hemácias, pertencendo ao grupo sanguíneo N. Pessoas heterozigóticas Ag^MAg^N têm ambos os aglutinogênios nas hemácias, pertencendo ao grupo sanguíneo MN.

Penetrância e expressividade gênicas

Nos casos que vimos até aqui, existe uma correspondência total entre genótipo e fenótipo, uma vez que o portador de dado genótipo expressa sempre o fenótipo correspondente. Por exemplo, coelhos com genótipo $c^{ch}c^{ch}$ têm sempre pelagem cinza e os com genótipo cc são sempre albinos; plantas boca-de-leão com genótipo F^VF^V produzem sempre flores vermelhas e assim por diante. Existem casos, no entanto, em que certa porcentagem dos portadores de dado genótipo não apresentam o fenótipo correspondente.

Um exemplo de variação fenotípica entre indivíduos com mesmo genótipo é encontrado no feijão-carioca. Essa variedade é homozigótica quanto ao alelo dominante L de um gene que condiciona a presença de coloração variegada no tegumento da semente, com manchas irregulares claras e escuras. O alelo recessivo desse gene, ℓ, condiciona semente totalmente pigmentada, sem variegação, e está presente na variedade conhecida como feijão-mulatinho (homozigótica $\ell\ell$).

Observando uma embalagem do feijão-carioca encontrado em qualquer supermercado, podemos verificar que a grande maioria das sementes é variegada. Entretanto, cerca de 5% dos grãos são totalmente pigmentados, assemelhando-se ao feijão-mulatinho. Assim, apesar de toda semente de feijão-carioca ser homozigótica LL, com dois alelos condicionantes da presença de coloração variegada, cerca de 5% delas não exibem o fenótipo correspondente, isto é, têm coloração homogênea. (Fig. 1.13)

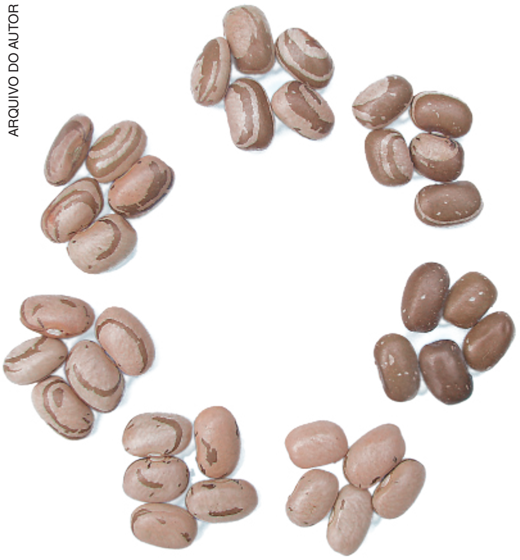
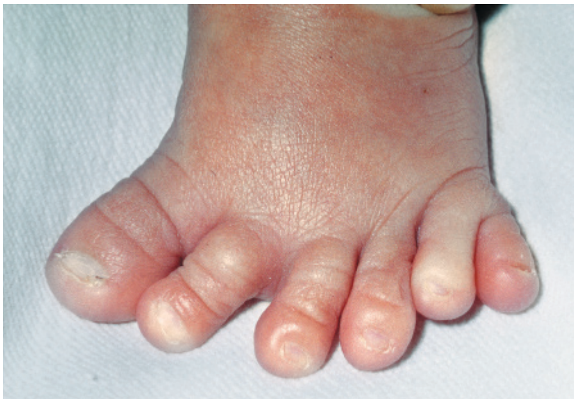

ARQUIVO DO AUTOR

Figura 1.13 Variação fenotípica em sementes de feijão-carioca (*Phaseolus vulgaris*), portadoras do alelo que condiciona a presença de manchas. As sementes medem cerca de 1 cm.

Os geneticistas utilizam o termo **penetrância** para se referir à porcentagem de indivíduos de dado genótipo que apresentam o fenótipo correspondente. Se esse valor é igual a 100%, ou seja, todos os indivíduos possuem o fenótipo esperado, diz-se que a característica apresenta **penetrância completa**; do contrário, fala-se em **penetrância incompleta**.

O caso do alelo *L* do feijão-carioca é um exemplo de penetrância incompleta. Como cerca de 5% dos grãos de feijão-carioca com genótipo *LL* não apresentam variegação, comportando-se como se tivessem genótipo $\ell\ell$, diz-se que a penetrância do alelo *L* é de 95%, pois é essa a porcentagem dos indivíduos portadores desse alelo que exibem o fenótipo correspondente – coloração variegada do tegumento.

Na espécie humana, o traço conhecido como polidactilia pós-axial (do grego *polys*, muitos, e *daktylos*, dedos), caracterizado pela presença de um dedo extranumerário próximo ao quinto dedo da mão ou do pé, é condicionado por um alelo dominante com penetrância incompleta. Um estudo populacional realizado na África estimou que a penetrância desse alelo é de 64,9%. Isso significa que 35,1% (100 − 64,9) dos portadores do alelo dominante não apresentam o traço polidactilia pós-axial, possuindo número normal de dedos. (Fig. 1.14)



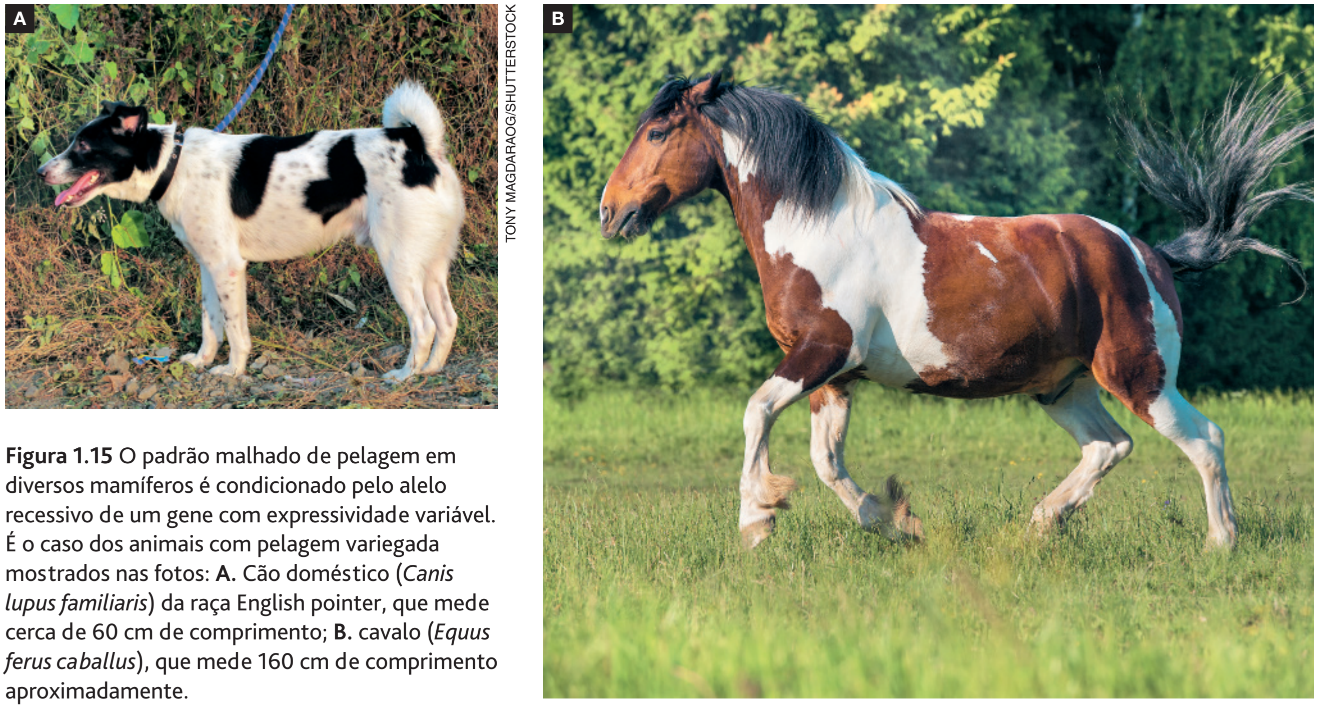
CNRI/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 1.14 Pé de criança com polidactilia.

Outro conceito importante em Genética refere-se ao modo como um gene se expressa nos indivíduos portadores. No feijão-carioca, por exemplo, os portadores do alelo *L* com fenótipo variegado (95% das sementes) diferem quanto ao padrão e à quantidade de manchas (veja figura 1.13). Diz-se, então, que o alelo *L* tem **expressividade gênica** variável.

O alelo que causa polidactilia pós-axial na espécie humana também tem expressividade variável, pois seus portadores podem apresentar desde apenas um dedo extranumerário em um dos membros até dedos extranumerários em todos os membros.

Outro exemplo de alelo com expressividade gênica variável é o que condiciona a presença de manchas na pelagem de mamíferos. Esse alelo é recessivo (*s*) e, em homozigose (*ss*), produz pelagem variegada, com áreas sem pigmento intercaladas com áreas de pelagem pigmentada. O alelo dominante do gene (*S*) condiciona o padrão pelagem homogênea, sem manchas. (Fig. 1.15)



TONY MAGDARAOG/SHUTTERSTOCK

MAKAROVA VIKTORIA/SHUTTERSTOCK

Figura 1.15 O padrão malhado de pelagem em diversos mamíferos é condicionado pelo alelo recessivo de um gene com expressividade variável. É o caso dos animais com pelagem variegada mostrados nas fotos: **A.** Cão doméstico (*Canis lupus familiaris*) da raça English pointer, que mede cerca de 60 cm de comprimento; **B.** cavalo (*Equus ferus caballus*), que mede 160 cm de comprimento aproximadamente.

1.4 Herança de grupos sanguíneos na espécie humana

Sistema ABO

No início do século XX, o médico austríaco Karl Landsteiner (1868-1943) verificou a existência de incompatibilidade sanguínea entre certas pessoas. Quando sangues diferentes eram misturados, em certos casos ocorria aglutinação das hemácias, formando aglomerados. Em 1902, a equipe de Landsteiner, com base nesses estudos, conseguiu classificar o sangue humano em quatro tipos, denominados A, B, AB e O, que caracterizam o **sistema ABO**.

Landsteiner concluiu que a incompatibilidade entre os grupos sanguíneos do sistema ABO era decorrente de uma reação entre certas substâncias presentes no plasma sanguíneo, denominadas **aglutininas**, e substâncias presentes na membrana das hemácias, denominadas **aglutinogênios**. Atualmente se sabe que as aglutininas são anticorpos capazes de reagir com certos polissacarídios dos aglutinogênios.

O sistema ABO caracteriza-se pela presença de dois tipos de aglutinogênios – A e B – e dois tipos de aglutininas – anti-A e anti-B. (Tab. 1.5)

TABELA 1.5 AGLUTINOGÊNIOS E AGLUTININAS DO SISTEMA ABO

Grupo sanguíneo	Aglutinogênios (nas hemácias)	Aglutininas (no plasma)
A	A	anti-B
B	B	anti-A
AB	A e B	—
O	—	anti-A e anti-B

Em 1930, Landsteiner recebeu o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus trabalhos sobre grupos sanguíneos da espécie humana. Graças à descoberta e ao estudo dos grupos sanguíneos, é possível realizar transfusões de sangue seguras entre pessoas de grupos compatíveis. Transfusões incompatíveis podem trazer graves consequências para a saúde e até levar à morte, pois as hemácias do sangue recebido se aglutinam e formam aglomerados, que entopem os capilares sanguíneos, prejudicando a circulação da pessoa que recebeu sangue de tipo incompatível com o seu.

Genética do sistema ABO

Os quatro fenótipos do sistema sanguíneo ABO – A, B, AB e O – são determinados por um gene que se apresenta em três formas alélicas: I^A, I^B e i. Trata-se, portanto, de um caso de alelos múltiplos.

O alelo I^A determina a presença do aglutinogênio A nas hemácias; o alelo I^B determina a presença do aglutinogênio B; o alelo i não determina nenhum aglutinogênio. Consequentemente, pessoas com genótipos I^AI^A ou I^Ai têm apenas aglutinogênio A nas hemácias e, portanto, sangue do tipo A; pessoas com genótipos I^BI^B ou I^Bi têm apenas aglutinogênio B e, portanto, sangue do tipo B; pessoas com genótipo I^AI^B têm os aglutinogênios A e B e seu sangue é do tipo AB; pessoas com genótipo ii não têm nenhum dos dois aglutinogênios e seu sangue é do tipo O.

Os alelos I^AI^B comportam-se como codominantes, uma vez que ambos se expressam na condição heterozigótica, produzindo, respectivamente, os aglutinogênios A e B. O alelo i é recessivo em relação aos outros dois; as relações de dominância entre esses três alelos podem ser representadas por $I^A = I^B > i$. (Tab. 1.6)

TABELA 1.6 RELAÇÃO ENTRE GENÓTIPOS E FENÓTIPOS NO SISTEMA ABO

Fenótipos	Genótipos
Grupo A	I^AI^A ou I^Ai
Grupo B	I^BI^B ou I^Bi
Grupo AB	I^AI^B
Grupo O	ii

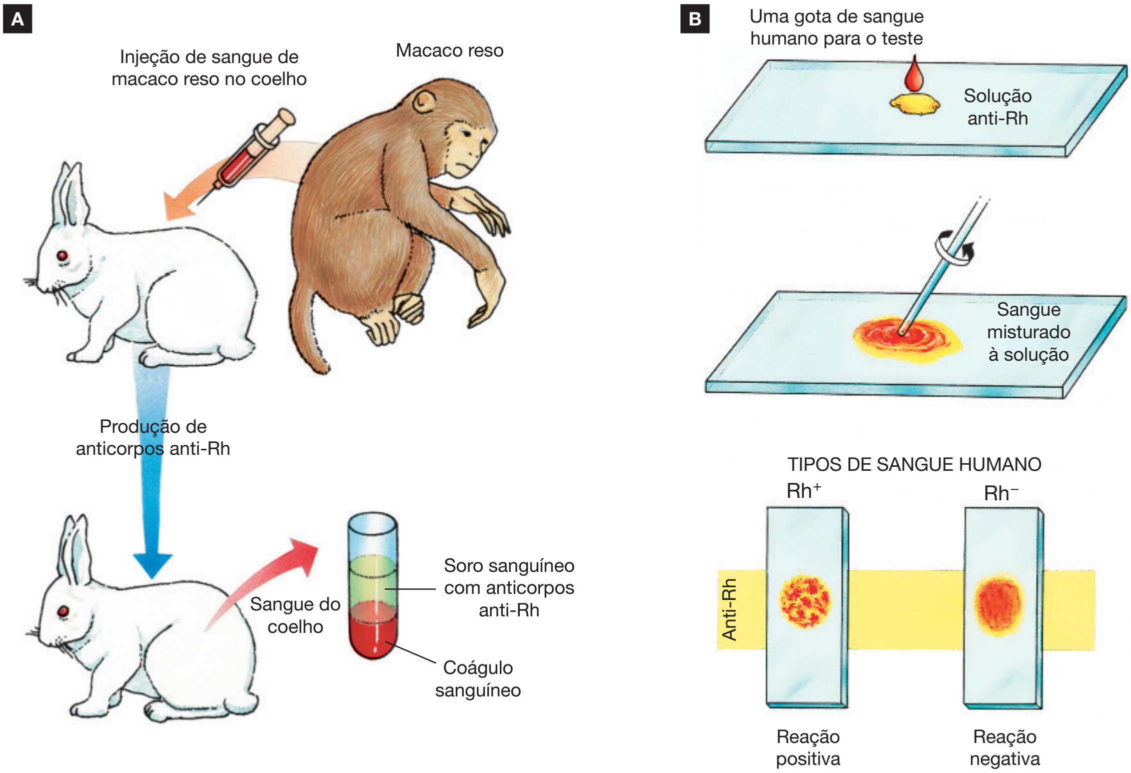
Hoje se conhece a maneira pela qual esses três alelos determinam os diferentes fenótipos do sistema ABO. O alelo I^A codifica uma enzima que transforma uma substância precursora H no aglutinogênio A; o alelo I^B codifica uma enzima ligeiramente diferente, que transforma o mesmo precursor H no aglutinogênio B; o alelo *i* é inativo e não leva à formação de nenhum aglutinogênio.

Sistema Rh

Na década de 1940, Landsteiner e sua equipe injetaram hemácias de um macaco reso (*Macaca mulatta*) em coelhos, os quais produziram um anticorpo denominado anti-Rh (abreviatura do inglês *anti-Rhesus*). Ao testar o anticorpo anti-Rh em sangue humano, os pesquisadores notaram que ele provocava a aglutinação das hemácias em cerca de 85% das pessoas testadas. A conclusão é que nas hemácias dessas pessoas havia um antígeno semelhante ao dos macacos resos, por isso denominado **fator Rh** (do inglês *Rhesus*). As pessoas que reagiram ao anti-Rh foram chamadas Rh positivas ou Rh^{+}.

Por outro lado, em cerca de 15% das pessoas testadas não ocorreu aglutinação das hemácias. A conclusão foi que essas pessoas não apresentavam o fator Rh, e por isso foram chamadas Rh negativas ou Rh^{-}.

Esse sistema de grupos sanguíneos, em que há dois fenótipos – Rh^{+} e Rh^{-} –, foi denominado **sistema Rh**. Para identificar o fenótipo de uma pessoa quanto ao sistema Rh, mistura-se uma gota de seu sangue a uma solução com anticorpos anti-Rh; se as hemácias aglutinarem, a pessoa é Rh^{+}; se não houver aglutinação, a pessoa é Rh^{-}. (Fig. 1.16)


A
Injeção de sangue de macaco reso no coelho
Macaco reso
Produção de anticorpos anti-Rh
Sangue do coelho
Soro sanguíneo com anticorpos anti-Rh
Coágulo sanguíneo
B
Uma gota de sangue humano para o teste
Solução anti-Rh
Sangue misturado à solução
TIPOS DE SANGUE HUMANO
Rh⁺
Rh⁻
Anti-Rh
Reação positiva
Reação negativa

ILUSTRAÇÕES: PAULO MANZI

Figura 1.16 A. Representação esquemática da produção de soro anti-Rh. **B.** Representação esquemática do método de determinação dos grupos sanguíneos do sistema Rh. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Genética do sistema Rh

Os fenótipos do sistema Rh são condicionados basicamente por dois alelos (*R* e *r*), em que *R* se comporta como dominante sobre *r*. Basta a pessoa ter um alelo dominante no genótipo (ser *RR* ou *Rr*) para ter o fator Rh nas hemácias e, portanto, fenótipo Rh^{+}; pessoas homozigóticas recessivas (*rr*) não têm o fator Rh, e seu fenótipo é Rh^{-}.

Incompatibilidade materno-fetal no sistema Rh

Pessoas Rh$^+$ não produzem anti-Rh. Pessoas Rh$^-$, em condições normais, também não apresentam anticorpos anti-Rh na circulação sanguínea. Esses anticorpos são produzidos apenas se a pessoa for previamente “sensibilizada”, isto é, se entrar em contato com sangue Rh$^+$, recebendo uma transfusão, por exemplo, ou no caso de mulheres Rh$^-$ que engravidam de uma criança Rh$^+$.

Na primeira gravidez de uma criança Rh$^+$ por uma mulher Rh$^-$, o nível de sensibilização é baixo e a quantidade de anticorpos na circulação materna geralmente não chega a afetar a criança. Na hora do parto, com a ruptura da placenta, hemácias do bebê passam para a circulação materna, sensibilizando a mulher e acarretando consequências para gestações posteriores. Se na próxima gravidez a criança é Rh$^+$, a mãe, já sensibilizada, passa a produzir rapidamente anticorpos anti-Rh; estes atravessam a placenta e entram na circulação do feto, destruindo suas hemácias, processo que continua a ocorrer no recém-nascido. (Fig. 1.17)

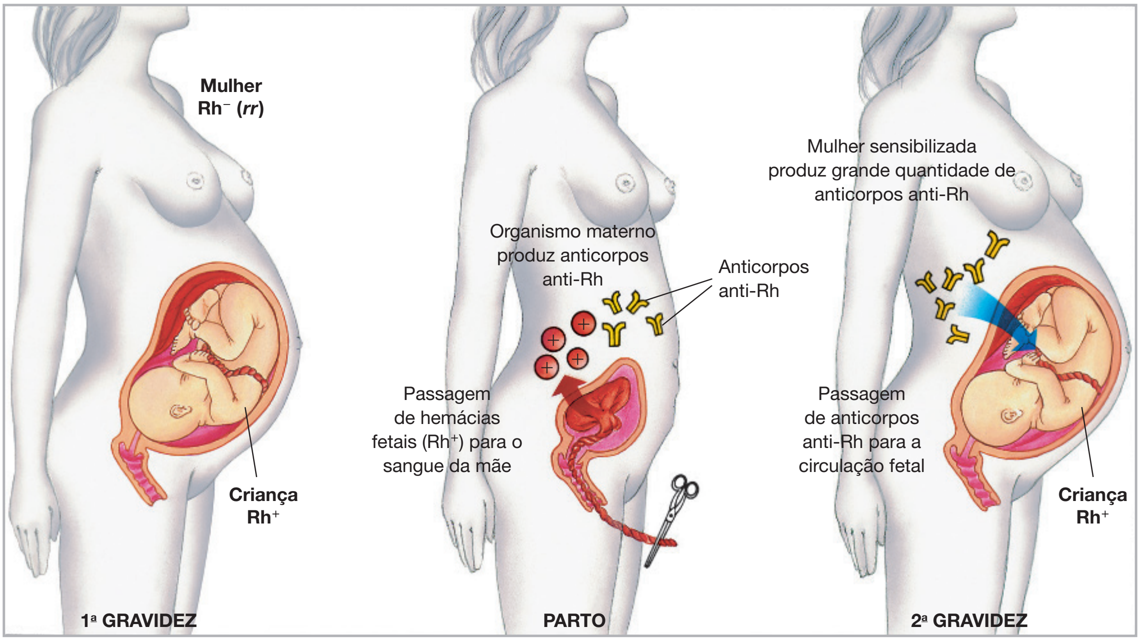
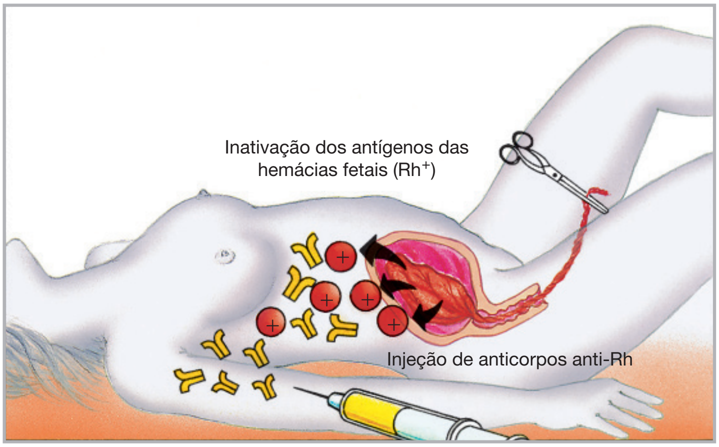

Mulher
Rh$^-$ (*rr*)
Criança
Rh$^+$
1ª GRAVIDEZ
Organismo materno
produz anticorpos
anti-Rh
Anticorpos
anti-Rh
Passagem
de hemácias
fetais (Rh$^+$) para o
sangue da mãe
PARTO
Mulher sensibilizada
produz grande quantidade de
anticorpos anti-Rh
Passagem
de anticorpos
anti-Rh para a
circulação fetal
Criança
Rh$^+$
2ª GRAVIDEZ

Figura 1.17 Representação esquemática do processo da sensibilização de uma mulher Rh$^-$ por uma criança Rh$^+$. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

A destruição das hemácias fetais pelos anticorpos maternos causa forte anemia no recém-nascido e icterícia (pele amarelada). Para compensar a diminuição de hemácias, o organismo fetal libera para a circulação hemácias imaturas, chamadas eritroblastos. Esses sintomas caracterizam a **eritroblastose fetal** ou **doença hemolítica do recém-nascido (DHRN)**. O substantivo “hemólise”, do qual deriva o adjetivo “hemolítica”, vem do grego *haimos*, sangue, e *lise*, destruição, referindo-se à destruição das hemácias.


Inativação dos antígenos das
hemácias fetais (Rh$^+$)
Injeção de anticorpos anti-Rh

ILUSTRAÇÕES: PAULO MANZI

Atualmente, graças aos conhecimentos sobre o sistema Rh de grupos sanguíneos, é possível evitar a eritroblastose fetal. Uma mulher Rh$^-$ que vai dar à luz uma criança Rh$^+$ recebe, no momento do parto, uma injeção intravenosa de anticorpos anti-Rh. Estes se combinam com as hemácias Rh$^+$, evitando que elas sensibilizem a mulher. (Fig. 1.18)

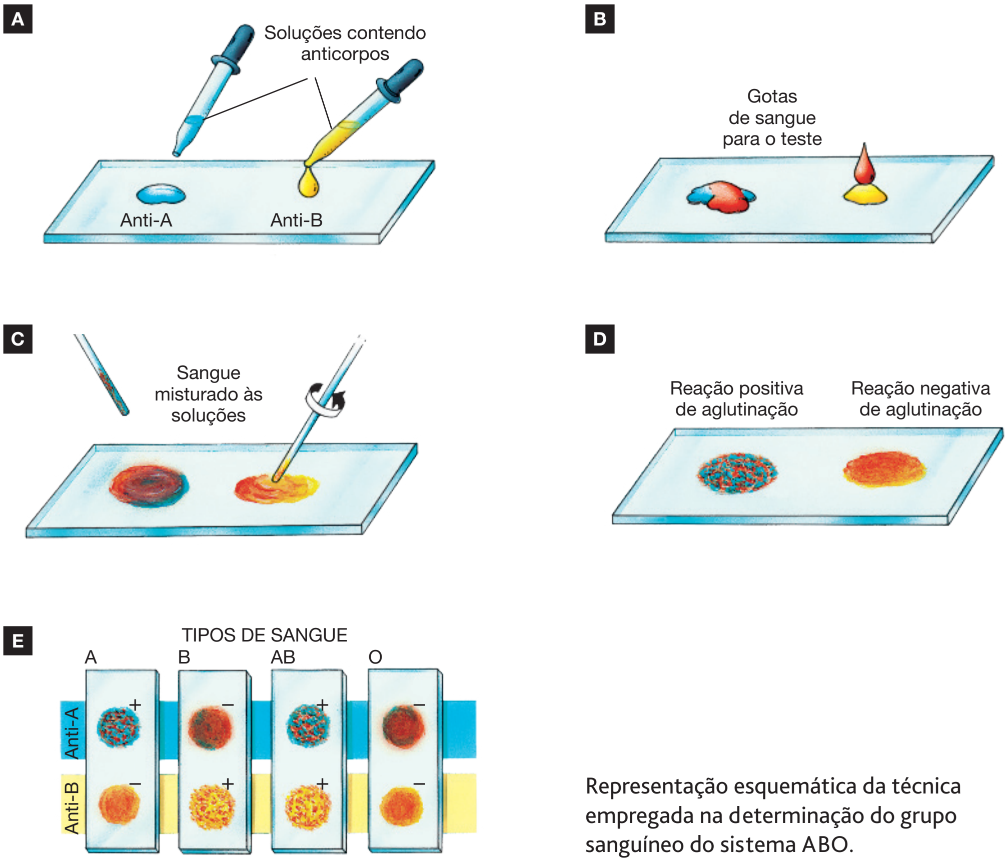
Figura 1.18 Representação esquemática do tratamento pós-parto realizado para evitar a sensibilização de uma mulher Rh$^-$ que deu à luz um primeiro filho Rh$^+$. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Ciência e cidadania

Sistema ABO e transfusões sanguíneas

Uma sugestão é propor que os estudantes divulguem a importância de se conhecer o próprio tipo sanguíneo. Usando palavras e termos que possam ser compreendidos por pessoas de diferentes idades e grau de escolaridade, as informações podem ser divulgadas nas redes sociais, de modo que os alunos sejam propagadores de conhecimento e exerçam a sua cidadania, uma vez que, ensinando a outras pessoas o que aprenderam sobre o sistema ABO, podem ajudar a salvar vidas.

1 É recomendável conhecer o próprio tipo sanguíneo e manter essa informação com os documentos pessoais. Embora os laboratórios hospitalares realizem exames para determinar a tipagem sanguínea antes de qualquer transfusão, ter essa informação ao alcance pode ser essencial em uma emergência. Lembre-se, também, de que a doação voluntária de sangue é um ato de cidadania.


A
Soluções contendo anticorpos
Anti-A
Anti-B
B
Gotas de sangue para o teste
C
Sangue misturado às soluções
D
Reação positiva de aglutinação
Reação negativa de aglutinação
E
TIPOS DE SANGUE
A
B
AB
O
Anti-A
Anti-B
+
−
−
+
+
+
−
−

ILUSTRAÇÕES: PAULO MANZI

Representação esquemática da técnica empregada na determinação do grupo sanguíneo do sistema ABO.

2 Para determinar os grupos sanguíneos do sistema ABO, misturam-se duas gotas do sangue da pessoa com duas soluções diferentes, uma delas contendo aglutinina anti-A, e a outra, aglutinina anti-B. Se ocorrer aglutinação do sangue apenas com a solução anti-A, a pessoa é do grupo A; se o sangue se aglutinar apenas com a solução anti-B, ela é do grupo B; se o sangue se aglutinar em ambas as soluções, a pessoa pertence ao grupo AB; se não houver aglutinação do sangue em nenhuma das soluções, a pessoa pertence ao grupo O.

3 Pessoas que têm apenas o aglutinogênio A na membrana das hemácias (tipo A) apresentam naturalmente no plasma a aglutinina anti-B, que é um anticorpo natural, presente sem que a pessoa tenha recebido previamente sangue do tipo B. Todavia, pessoas que têm apenas o aglutinogênio B na membrana das hemácias (tipo B) apresentam no plasma a aglutinina anti-A.

4 Uma pessoa portadora de determinada aglutinina não pode receber sangue cujas hemácias tenham o aglutinogênio correspondente. Assim, pessoas do grupo sanguíneo A, que têm aglutinina anti-B no plasma, não podem receber sangue do tipo B nem do tipo AB, que contêm aglutinogênio B. Da mesma forma, pessoas do grupo sanguíneo B, que têm aglutinina anti-A no plasma, não podem receber sangue do tipo A nem do tipo AB, pois ambos contêm aglutinogênio A.

5 Pessoas do grupo sanguíneo AB, que não têm aglutininas no plasma, podem receber qualquer tipo de sangue (A, B, AB ou O), sendo por isso chamadas **receptores universais** quanto ao sistema ABO.

Por outro lado, pessoas do grupo sanguíneo O, que têm os dois tipos de aglutinina no plasma, só podem receber sangue de seu próprio grupo sanguíneo. Entretanto, como a membrana de suas hemácias não apresenta nenhum dos dois aglutinogênios (A ou B), as pessoas do grupo sanguíneo O podem doar sangue para pessoas de qualquer outro grupo do sistema ABO e por isso são chamadas **doadores universais**.

TRANSFUSÃO SANGUÍNEA NO SISTEMA ABO

Grupo sanguíneo da pessoa	Recebe de	Doa para
A	A e O	A e AB
B	B e O	B e AB
AB	A, B, AB e O	AB
O	O	A, B, AB e O

6 É importante considerar que as hemácias do sangue doado entram imediatamente em contato com o plasma sanguíneo do receptor. Se nesse plasma houver aglutininas correspondentes aos aglutinogênios das hemácias que entram, estas serão imediatamente aglutinadas. Por exemplo, se hemácias presentes em um sangue do tipo A, portadoras de aglutinogênio A, forem doadas a uma pessoa de tipo sanguíneo B, serão imediatamente aglutinadas pela aglutinina anti-A do receptor.

7 Uma dúvida comum é se o plasma do sangue doado também tem efeito relevante na transfusão. Considerando que a quantidade de sangue doada é relativamente bem menor que a do sangue da pessoa que o recebe, a resposta é não. Isso porque as aglutininas do plasma doador diluem-se no plasma do receptor, causando pouca ou nenhuma aglutinação de suas hemácias. Assim, na prática, o que é relevante na transfusão são as aglutininas do plasma do receptor e os aglutinogênios das hemácias do doador.

8 Apesar desses dados sobre as transfusões possíveis, nos bancos de sangue dá-se preferência a transfusões entre pessoas com o mesmo tipo sanguíneo, considerando-se também a compatibilidade quanto ao sistema Rh.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

1. Leia o primeiro parágrafo. Por que a informação sobre o tipo sanguíneo é importante em uma transfusão? Em caso de dúvida, confira o item do capítulo relativo a esse assunto.
2. Leia o segundo parágrafo, que mostra a técnica de detecção do tipo sanguíneo quanto ao sistema ABO, e observe a figura. Certifique-se de ter compreendido o princípio da técnica, que detecta o tipo de aglutinogênio presente nas hemácias da pessoa. Elabore uma tabela que relacione os quatro fenótipos de grupo sanguíneo – A, B, AB e O – aos seguintes aspectos: **a)** genótipos possíveis para cada tipo (preencha após ler o item *Genética do sistema ABO*, na página 30); **b)** tipo(s) de aglutinogênio nas hemácias. Deixe ainda uma terceira linha ou coluna a ser preenchida com o(s) tipo(s) de aglutinina presente(s) no plasma. Faça isso quando solicitado, a seguir.
3. Leia atentamente o terceiro parágrafo, que se refere à presença ou ausência de aglutininas no plasma. Note que o texto não explica as aglutininas dos tipos AB e O. Siga o mesmo raciocínio e identifique as aglutininas encontradas nesses tipos de sangue. Em seguida, complete a tabela iniciada na questão anterior.
4. Leia o quarto parágrafo, que apresenta um importante aspecto de compatibilidade nas transfusões quanto ao sistema ABO. A seguir, responda: quais são os aspectos mais relevantes em uma transfusão: os aglutinogênios ou as aglutininas do doador? E do receptor? Explique.
5. No quinto parágrafo e na tabela correspondente são apresentados os conceitos de doador universal e de receptor universal. Certifique-se de ter compreendido a relação entre as aglutininas do receptor e os aglutinogênios do doador. Com base nesses dados, explique por que o tipo O é chamado doador universal e o tipo AB é chamado receptor universal.
6. Leia o sexto parágrafo, que explica mais detalhadamente a dinâmica das transfusões tendo em vista aglutininas e aglutinogênios. Esse parágrafo acrescentou algo ao que você já sabia? O quê?
7. No oitavo e último parágrafo, menciona-se o procedimento habitual nas transfusões de sangue. Qual é ele e qual sua vantagem?

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. Qual alternativa contém o ponto fundamental da hipótese proposta por Mendel, que constitui a 1ª lei da herança? 1. c

a) Autofecundação.
b) Fecundação cruzada.
c) Separação dos fatores hereditários na formação dos gametas.
d) União dos fatores hereditários na formação dos gametas.

2. A incompatibilidade sanguínea no sistema Rh entre mãe e feto pode levar ao(à): 2. b

a) albinismo do tipo I.
b) eritroblastose fetal.
c) codominância aglutinogênica.
d) desenvolvimento de alelos letais.

3. Sobre a relação entre genótipo, fenótipo e ambiente é correto dizer que: 3. b

a) o fenótipo é determinado exclusivamente pelo genótipo.
b) o fenótipo é determinado pelo genótipo em interação com o ambiente.
c) o genótipo é determinado exclusivamente pelo fenótipo.
d) o genótipo é determinado pelo fenótipo em interação com o ambiente.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 4 e 5.

a) dois fenótipos, um correspondente aos genótipos homozigótico dominante e heterozigótico, e outro correspondente ao genótipo homozigótico recessivo.
b) dois fenótipos, um correspondente aos genótipos homozigótico recessivo e heterozigótico, e outro correspondente ao genótipo homozigótico dominante.
c) três fenótipos, cada um correspondente a um genótipo.
d) apenas um fenótipo, correspondente aos três genótipos.

4. Um gene com dois alelos, um dominante sobre o outro, determina (▬▬). 4. a

5. Um gene com dois alelos e dominância incompleta determina (▬▬). 5. c

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 6 e 7.

a) duas células, cada uma com os alelos A e *a*.
b) duas células, uma com o alelo A, e a outra com alelo *a*.
c) quatro células, cada uma com os alelos A e *a*.
d) quatro células, duas com o alelo A e duas com o alelo *a*.

6. Uma célula com genótipo A*a* origina, ao fim da meiose, (▬▬). 6. d

7. Uma célula com genótipo A*a* origina, ao fim da mitose, (▬▬). 7. a

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 8 a 10.

a) 1 : 1
b) 3 : 1
c) 1 : 2 : 1
d) 1 : 1 : 1 : 1

8. Um indivíduo heterozigótico em relação a um par de alelos forma gametas diferentes na proporção de (▬▬). 8. a

9. O cruzamento entre indivíduos heterozigóticos em relação a um gene em que os alelos apresentam dominância incompleta ou codominância resultará em uma descendência com proporção fenotípica de (▬▬). 9. c

10. O cruzamento entre indivíduos heterozigóticos em relação a um gene em que um dos alelos é dominante sobre o outro resultará em uma descendência com proporção fenotípica de (▬▬). 10. b

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 11 e 12.

a) 100% de indivíduos com fenótipo dominante.
b) 100% de indivíduos com fenótipo recessivo.
c) 75% de indivíduos com fenótipo dominante e 25% com fenótipo recessivo.
d) 50% de indivíduos com fenótipo dominante e 50% com fenótipo recessivo.

11. O chamado cruzamento-teste, em que se cruza um indivíduo de fenótipo dominante (*AA* ou *Aa*) com um de fenótipo recessivo (*aa*), revela que o indivíduo testado é homozigótico se sua descendência for constituída por (▬▬). 11. a

12. O cruzamento-teste revela que um indivíduo de fenótipo dominante é heterozigótico se sua descendência for constituída por (▬▬). 12. d

Utilize as alternativas a seguir para completar as questões de 13 a 16.

a) grupo sanguíneo A
b) grupo sanguíneo B
c) grupo sanguíneo AB
d) grupo sanguíneo O

13. As hemácias de um indivíduo do (▬▬) não se aglutinam com nenhum dos dois tipos de soro, anti-A ou anti-B. 13. d

14. As hemácias de um indivíduo do (▬) aglutinam-se com ambos os tipos de soro, anti-A e anti-B. 14. c

15. As hemácias de um indivíduo do (▬) aglutinam-se com soro anti-A, mas não com anti-B. 15. a

16. As hemácias de um indivíduo do (▬) aglutinam-se com soro anti-B, mas não com anti-A. 16. b

Utilize as alternativas a seguir para completar as questões de 17 a 20.

- **a)** pode receber sangue de pessoas A, B, AB e O, e doar apenas para pessoas AB.
- **b)** pode receber sangue de pessoas A e O, e doar para pessoas A e AB.
- **c)** pode receber sangue de pessoas B e O, e doar para pessoas B e AB.
- **d)** pode receber sangue apenas de pessoas O, e doar para pessoas A, B, AB e O.

17. Uma pessoa do grupo sanguíneo A (▬). 17. b

18. Uma pessoa do grupo sanguíneo B (▬). 18. c

19. Uma pessoa do grupo sanguíneo AB (▬). 19. a

20. Uma pessoa do grupo sanguíneo O (▬). 20. d

21. Duas pessoas, uma do grupo sanguíneo AB e outra do grupo O, podem ter filhos com sangue do tipo: 21. c

- **a)** AB, apenas.
- **b)** O, apenas.
- **c)** A e B.
- **d)** A, B e O.

22. Duas pessoas do grupo sanguíneo AB podem ter filhos com sangue do tipo: 22. d

- **a)** AB, apenas.
- **b)** O, apenas.
- **c)** A e B.
- **d)** A, B e AB.

23. Duas pessoas, uma do grupo A e outra do grupo B, ambas com pais do grupo O, podem ter filhos com sangue do tipo: 23. d

- **a)** AB, apenas.
- **b)** A e B, apenas.
- **c)** A, B e O, apenas.
- **d)** A, B, AB e O.

24. Considere as seguintes situações:

I. Mãe Rh^+ e pai Rh^-
II. Mãe Rh^- e pai Rh^+
III. Mãe e pai Rh^+
IV. Mãe e pai Rh^-

Pode ocorrer eritroblastose fetal apenas: 24. b

- **a)** na situação I.
- **b)** na situação II.
- **c)** nas situações I e II.
- **d)** nas situações II e IV.

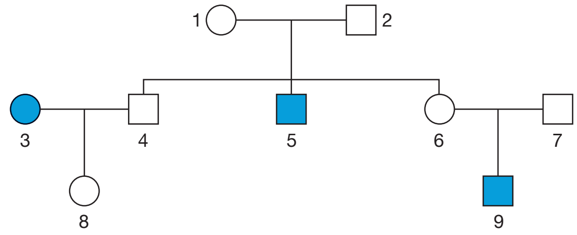
Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

25. Um macho da mosca drosófila de asa longa, ao ser cruzado com uma fêmea de asa também longa, produziu apenas descendentes de asas longas. O mesmo macho, ao ser cruzado com outra fêmea de asa longa, produziu 75% de descendentes de asas longas e 25% de asas curtas. Quais são os prováveis genótipos do macho e das duas fêmeas?

26. Se o mesmo macho de drosófila da questão anterior fosse submetido ao cruzamento-teste (isto é, fosse cruzado com uma fêmea homozigótica recessiva), qual seria o resultado esperado?

27. Analise o heredograma a seguir, em que os indivíduos masculinos são representados por quadrados, e os femininos, por círculos. Os indivíduos escuros são homozigóticos recessivos.



ADILSON SECCO

- **a)** Quais são os indivíduos certamente heterozigóticos?
- **b)** Qual é a probabilidade de o indivíduo 4 ser heterozigótico?
- **c)** Qual é a probabilidade de que um filho do casal 3 × 4 seja homozigótico recessivo?

28. Na raça de gado Shorthorn, há indivíduos com pelagem vermelha, indivíduos com pelagem branca e indivíduos com pelagem ruã (uma mistura de vermelho e branco). Cruzamentos entre indivíduos do tipo ruã produzem prole na qual $\frac{1}{4}$ dos indivíduos tem pelagem vermelha, $\frac{1}{4}$ tem pelagem branca e $\frac{1}{2}$ tem pelagem ruã. Qual é o provável tipo de herança dessa característica? Explique.

29. Em uma manada de gado Shorthorn de pelagem tipo ruã, há seiscentas vacas prenhes. Que tipos de coloração de pelagem esperamos encontrar entre os bezerros que virão a nascer e qual a quantidade esperada de bezerros de cada tipo?

30. Em rabanetes, a forma da raiz pode ser arredondada, ovalada ou alongada. Cruzamentos entre plantas de raiz alongada e plantas de raiz arredondada produziram apenas indivíduos com raiz ovalada. Em cruzamentos entre indivíduos com raízes ovaladas foram obtidos 400 descendentes, dos quais 100 apresentaram raízes alongadas, 195 raízes ovaladas e 105 raízes arredondadas.

- **a)** Qual é o provável tipo de herança dessa característica?
- **b)** Se cruzássemos rabanetes de raízes ovaladas com rabanetes de raízes arredondadas, qual seria a proporção fenotípica esperada na descendência?

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

31. Atividade prática: Simulando a separação de alelos na meiose

Nesta atividade vamos focar nossa atenção na segregação dos alelos. Para isso, representaremos os cromossomos por modelos de massa de modelar, barbantes coloridos grossos ou outro material similar. Aplicaremos letras nos cromossomos para representar os alelos de alguns genes. O objetivo é simular o processo de meiose, evidenciando que a separação dos cromossomos é responsável pela segregação dos alelos dos genes.

Sugerimos trabalhar em grupos de três ou quatro colegas para que haja troca de ideias durante a elaboração dos modelos. Aproveite a atividade para revisar seus conceitos de célula diploide, cromossomos homólogos, cromátide e centrômero. Se possível, faça um registro fotográfico ou em vídeo da atividade e prepare um material de divulgação, como um vídeo ou uma sequência de imagens com legendas.

Material

- massa de modelar (ou barbantes grossos) de duas cores diferentes;
- dois pequenos quadrados de papel com aproximadamente 1 cm de lado;
- folhas grandes de papel de embrulho;
- opcional: câmera fotográfica ou de vídeo.

Procedimento

1. Forre a mesa de trabalho com uma folha de papel de embrulho e desenhe sobre ela um círculo grande, para representar os limites da célula. Com a massa de modelar, represente um par de cromossomos metacêntricos. Uma célula com apenas esses cromossomos teria número diploide $2n = 2$.
2. Os cromossomos devem ser representados por dois rolinhos de uns 10 cm de comprimento e 0,5 cm de diâmetro. Uma bolinha de massa de cor diferente, grudada à região mediana de cada cromossomo, representa o centrômero.
3. Em um dos quadrados de papel, escreva “A”; no outro, escreva “a”. Esses papéis representarão os alelos.
4. Cole os alelos nos cromossomos. Os alelos podem ser colocados em qualquer posição, mas lembre-se de que devem ocupar a mesma posição relativa em cromossomos homólogos (mesmo loco gênico).
5. Coloque os modelos sobre a folha de papel de embrulho e dê início à simulação. O primeiro passo é representar a duplicação dos cromossomos, fazendo novos rolinhos idênticos aos anteriores e unindo-os aos cromossomos correspondentes pela região do centrômero. Quando você duplica o cromossomo, o que ocorre com o gene? Os alelos devem ser idênticos nas cromátides-irmãs de um cromossomo duplicado? Em caso de dúvida, confira nos esquemas deste livro.
6. Distribua os modelos de cromossomos duplicados sobre a folha de papel de embrulho e inicie a simulação. Que tipo de separação cromossômica ocorre na anáfase I? E na anáfase II?

Terminada a simulação, discuta as seguintes questões com seus colegas:

a) Qual é a relação entre a separação cromossômica na meiose e a segregação dos alelos de um gene na formação dos gametas?

b) Como a meiose explica a formação de 50% de gametas contendo um dos alelos e 50% contendo o outro alelo de um gene?

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (Fuvest-SP) Em plantas de ervilha ocorre, normalmente, autofecundação. Para estudar os mecanismos de herança, Mendel fez fecundações cruzadas, removendo as anteras da flor de uma planta homozigótica de alta estatura e colocando, sobre seu estigma, pólen recolhido da flor de uma planta homozigótica de baixa estatura. Com esse procedimento, o pesquisador: 1. c

a) impediu o amadurecimento dos gametas femininos.

b) trouxe gametas femininos com alelos para baixa estatura.

c) trouxe gametas masculinos com alelos para baixa estatura.

d) promoveu o encontro de gametas com os mesmos alelos para estatura.

e) impediu o encontro de gametas com alelos diferentes para estatura.

2. (UFJF-MG) Além do teste de DNA, há exames mais simples que podem ajudar a esclarecer dúvidas sobre paternidade. Por exemplo, o teste de tipagem sanguínea do sistema ABO permite determinar quem não pode ser o pai. Qual das alternativas apresenta uma situação em que esse exame assegura a exclusão da paternidade? 2. b

a) O filho é do tipo O, a mãe do tipo O e o suposto pai do tipo A.

b) O filho é do tipo AB, a mãe do tipo AB e o suposto pai do tipo O.

c) O filho é do tipo AB, a mãe do tipo A e o suposto pai do tipo B.

d) O filho é do tipo B, a mãe do tipo B e o suposto pai do tipo O.

e) O filho é do tipo A, a mãe do tipo A e o suposto pai do tipo B.

3. (UFSCar-SP) Em relação ao sistema sanguíneo ABO, um garoto, ao se submeter ao exame sorológico, revelou ausência de aglutininas. Seus pais apresentaram grupos sanguíneos diferentes e cada um apresentou apenas uma aglutinina. Os prováveis genótipos dos pais do menino são: 3. e

a) I^Bi — ii.

b) I^Ai — ii.

c) I^AI^B — I^Ai.

d) I^AI^B — I^AI^A.

e) I^Ai — I^Bi.

4. (UFRGS-RS) Em Genética, o cruzamento-teste é utilizado para determinar 4. e

a) o número de genes responsável por uma característica.

b) o padrão de herança de uma característica.

c) a recessividade de uma característica.

d) o grau de penetrância de uma característica.

e) a homozigose ou a heterozigose de um gene dominante.

5. (UFPR) Os seres vivos são acometidos por várias doenças, que podem ter diversas origens. A exostose múltipla é uma anomalia que se caracteriza por lesões nos ossos e ocorre tanto em seres humanos quanto em cavalos. Segundo os pesquisadores que a estudaram, é determinada por um gene autossômico dominante. Considere um macho afetado, filho de uma fêmea normal, que seja cruzado com uma fêmea também normal. A probabilidade de esse cruzamento produzir um descendente (macho ou fêmea) normal é de: 5. c

a) 100%. **b)** 75%. **c)** 50%. **d)** 25%. **e)** 0%.

6. (Fuvest-SP) Numa espécie de planta, a cor das flores é determinada por um par de alelos. Plantas de flores vermelhas cruzadas com plantas de flores brancas produzem plantas de flores cor-de-rosa. Do cruzamento entre plantas de flores cor-de-rosa, resultam plantas com flores 6. b

a) das três cores, em igual proporção.

b) das três cores, prevalecendo as cor-de-rosa.

c) das três cores, prevalecendo as vermelhas.

d) somente cor-de-rosa.

e) somente vermelhas e brancas, em igual proporção.

7. (Enem-MEC) Em um experimento, preparou-se um conjunto de plantas por técnica de clonagem a partir de uma planta original que apresentava folhas verdes. Esse conjunto foi dividido em dois grupos, que foram tratados de maneira idêntica, com exceção das condições de iluminação, sendo um grupo exposto a ciclos de iluminação solar natural e outro mantido no escuro. Após alguns dias, observou-se que o grupo exposto à luz apresentava folhas verdes como a planta original e o grupo cultivado no escuro apresentava folhas amareladas. Ao final do experimento, os dois grupos de plantas apresentaram: 7. b

a) os genótipos e os fenótipos idênticos.

b) os genótipos idênticos e os fenótipos diferentes.

c) diferenças nos genótipos e fenótipos.

d) o mesmo fenótipo e apenas dois genótipos diferentes.

e) o mesmo fenótipo e grande variedade de genótipos.

Questões discursivas

8. (Unicamp-SP) Gatos Manx são heterozigotos para uma mutação que resulta na ausência de cauda (ou cauda muito curta), presença de pernas traseiras grandes e um andar diferente dos outros. O cruzamento de dois gatos Manx produziu dois gatinhos Manx para cada gatinho normal de cauda longa (2 : 1), em vez de três para um (3 : 1), como seria esperado pela genética mendeliana.

a) Qual a explicação para esse resultado?

b) Dê os genótipos dos parentais e dos descendentes. (Utilize as letras *B* e *b* para suas respostas.)

9. (UFRJ) Alguns centros de pesquisa na Inglaterra estão realizando um programa de triagem populacional para detectar a fibrose cística, uma doença autossômica recessiva grave particularmente comum em caucasianos. Toda pessoa na qual o alelo recessivo é detectado recebe orientação a respeito dos riscos de vir a ter um descendente com anomalia. Um inglês heterozigoto para essa característica é casado com uma mulher normal, filha de pais normais, mas cujo irmão morreu na infância, vítima de fibrose cística. Calcule a probabilidade de que esse casal venha a ter uma criança com fibrose cística. Justifique sua resposta.

10. (Unicamp-SP) No início do século XX, o austríaco Karl Landsteiner, misturando o sangue de indivíduos diferentes, verificou que apenas algumas combinações eram compatíveis. Descobriu, assim, a existência do chamado sistema ABO em humanos. No quadro abaixo são mostrados os genótipos possíveis e os aglutinogênios correspondentes a cada tipo sanguíneo.

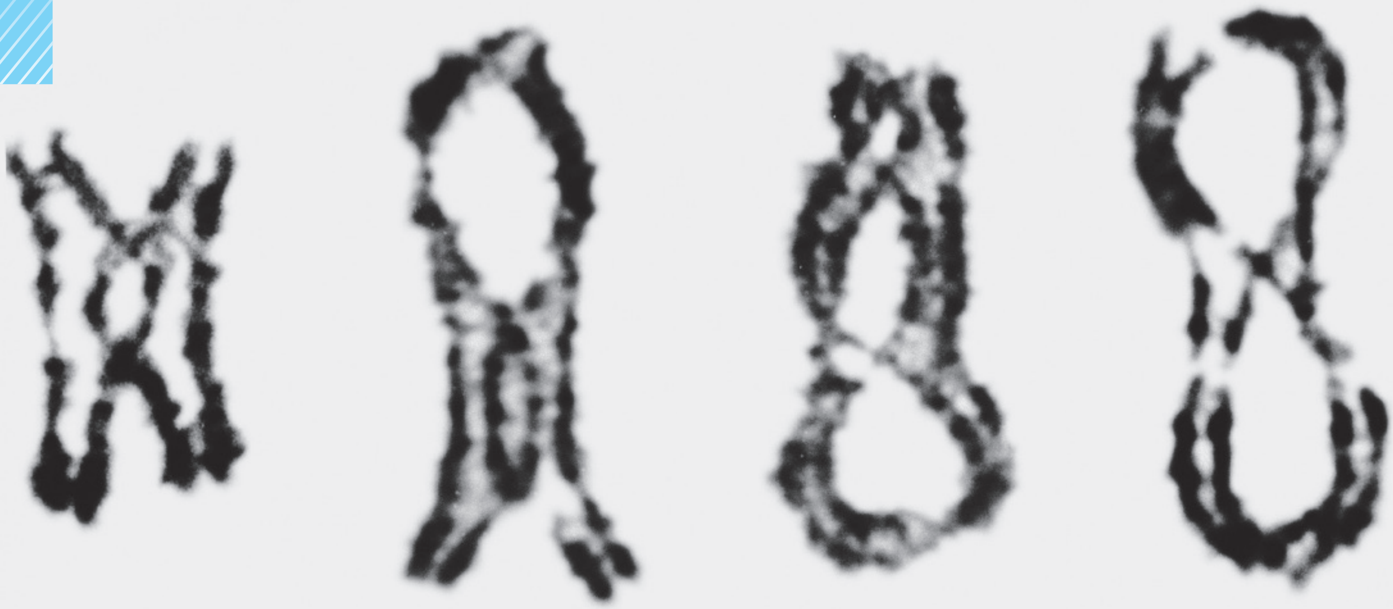
Tipo sanguíneo	Genótipo	Aglutinogênio
A	I^AI^A ou I^Ai	A
B	I^BI^B ou I^Bi	B
A e B	I^AI^B	A e B
O	ii	Nenhum

a) Que tipo ou tipos sanguíneos poderiam ser utilizados em transfusão de sangue para indivíduos de sangue tipo A? Justifique.

b) Uma mulher com tipo sanguíneo A, casada com um homem com tipo sanguíneo B, tem um filho considerado doador de sangue universal. Qual a probabilidade de esse casal ter um(a) filho(a) com tipo sanguíneo AB? Justifique sua resposta.

Capítulo 2

As bases cromossômicas da herança



SCIENCE VU/B. JOHN/VISUALS UNLIMITED/CORBIS/LATINSTOCK

Fotomicrografia de quatro pares de cromossomos em prófase I da meiose. As trocas de pedaços entre cromossomos homólogos são visualizadas no microscópio fotônico como quiasmas, pontos de cruzamento entre as cromátides (Microscópio fotônico; aumento ≈ 9.000×; cores artificiais.)

Por dentro das "caixas-pretas": o poder da ciência

Talvez algum professor de ciências já lhe tenha proposto o seguinte desafio: descobrir o que há em uma caixa fechada, sugestivamente embrulhada em papel preto. Para isso, você pode ter segurado a caixa, avaliado várias de suas características – como a massa, a textura, o cheiro e os ruídos produzidos – e levantado hipóteses.

Essa analogia se aplica a certos aspectos do mundo natural que não podemos analisar diretamente com nossos sentidos. Mendel, por exemplo, ao fazer cruzamentos de ervilhas, observou os tipos de descendentes que surgiram e tentou entender o que se passava nas plantas genitoras. Usando um raciocínio matemático avançado para a Biologia da época, ele deduziu que dentro das "caixas-pretas genitoras" devia haver fatores hereditários de natureza desconhecida que se separavam no processo de formação dos gametas.

Mais de 35 anos depois, o citologista estadunidense Walter Sutton (1877-1916), estimulado pela redescoberta do trabalho de Mendel e munido de suas próprias observações microscópicas da meiose de gafanhoto, abriu uma ampla e luminosa janela na caixa-preta em que o monge-cientista havia penetrado: ao observar que os cromossomos homólogos se separam durante a formação dos gametas, assim como os fatores mendelianos, Sutton concluiu que os fatores deviam estar localizados nos cromossomos. Essa ideia representou um formidável avanço na compreensão dos mecanismos genéticos, inaugurando a chamada teoria cromossômica da herança, desenvolvida nas primeiras décadas do século XX principalmente pelo grupo de drosofilistas liderado pelo geneticista estadunidense Thomas Hunt Morgan (1866-1945).

Ano após ano, novas descobertas e a formulação de novas teorias têm permitido aos cientistas adentrar muitas caixas-pretas do desconhecido e, no interior delas, deparar-se com novas caixas repletas de desafios à nossa compreensão. A história da Genética ilustra como a ciência permite solucionar problemas em mundos que não podemos visualizar diretamente, mas que podemos compreender e até prever com base no raciocínio lógico e em testes de hipóteses.

A importância do assunto

Neste capítulo continuaremos a estudar os princípios que regem a herança biológica e o passo a passo de sua descoberta, empreendida por várias gerações de cientistas. Ao imaginar a existência de fatores presentes aos pares nos indivíduos e que esses fatores se separavam na formação dos gametas, Mendel estava antecipando, sem saber, as ideias de diploidia e meiose. Um cientista, ao abrir uma janela em uma caixa-preta e lançar luzes sobre o desconhecido, contribui para que seus colegas avancem cada vez mais no conhecimento científico sobre determinado tema. Podemos evidenciar isso ao estudar os trabalhos de Mendel, seguidos pelos de Sutton e dos drosofilistas liderados por Morgan, que construíram as bases da Genética moderna.

Veremos como Mendel, ao estudar duas ou mais características simultaneamente, ampliou a compreensão sobre os princípios básicos da herança com a lei da segregação independente dos fatores hereditários. Hoje sabemos que a segregação independente é um aspecto particular da hereditariedade, que ocorre entre genes localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos.

Em seguida, veremos alguns casos de genes com segregação independente que interagem na produção de características como a cor da plumagem de periquitos e da pelagem de cães labradores.

Finalmente, no último item deste capítulo, estudaremos o que ocorre com genes localizados no mesmo cromossomo e que, portanto, não se segregam independentemente. Esse estudo possibilita estimar a taxa de permutação e a distância entre os locos dos genes envolvidos.

O conhecimento sobre segregação independente dos genes e sobre os demais assuntos tratados aqui permite prever genótipos e fenótipos para algumas características humanas, como tipo sanguíneo e cor dos olhos, por exemplo. Esse conhecimento pode ser usado também em testes de exclusão de paternidade e na seleção de plantas e de animais com as características de interesse.

À medida que progredimos no estudo da Genética, os conhecimentos vão se ampliando gradativamente. Por isso, antes de prosseguir, certifique-se de que você domina os conceitos abordados no capítulo anterior. Dessa forma, você poderá desvendar com mais facilidade o conteúdo de mais uma caixa-preta.

2.1 A segregação independente de genes

Além de estudar isoladamente cada uma das sete características da ervilha, como vimos no capítulo anterior, Mendel também analisou a transmissão combinada de duas ou mais características. Em um desses experimentos, por exemplo, ele considerou, ao mesmo tempo, a cor dos cotilédones da semente – amarela ou verde – e sua textura – lisa ou rugosa. (Fig. 2.1)

Plantas originadas de sementes amarelas lisas puras (homozigóticas) foram cruzadas com plantas originadas de sementes verdes rugosas, traços recessivos. Como era de esperar, todas as sementes produzidas na geração F_1 eram amarelas e lisas.

A geração F_2, obtida por autofecundação das plantas F_1, era composta de quatro tipos de sementes, distribuídas aproximadamente nas seguintes frações: $\frac{9}{16}$ amarelas lisas; $\frac{3}{16}$ amarelas rugosas; $\frac{3}{16}$ verdes lisas; $\frac{1}{16}$ verde rugosa. Ou seja, a proporção era de 9 amarelas lisas : 3 amarelas rugosas : 3 verdes lisas : 1 verde rugosa (9 : 3 : 3 : 1).

Como Mendel interpretou esses resultados? Aplicando um raciocínio matemático-probabilístico, ele concluiu que a separação do par de fatores para cor da semente em nada interferia na segregação dos fatores para a textura. Em outras palavras, essas segregações eram ocorrências totalmente independentes.

É importante levar os estudantes a perceber o mérito de Mendel em aplicar pioneiramente um raciocínio matemático-probabilístico ao estudo da hereditariedade, que permitiu antever a segregação meiótica, descoberta mais de trinta anos depois.

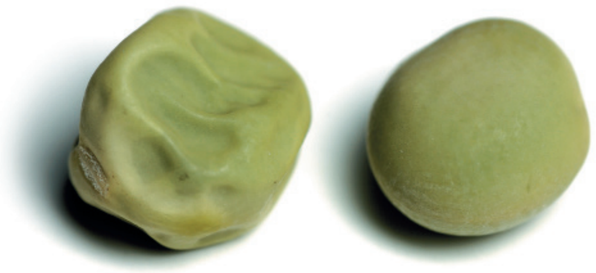
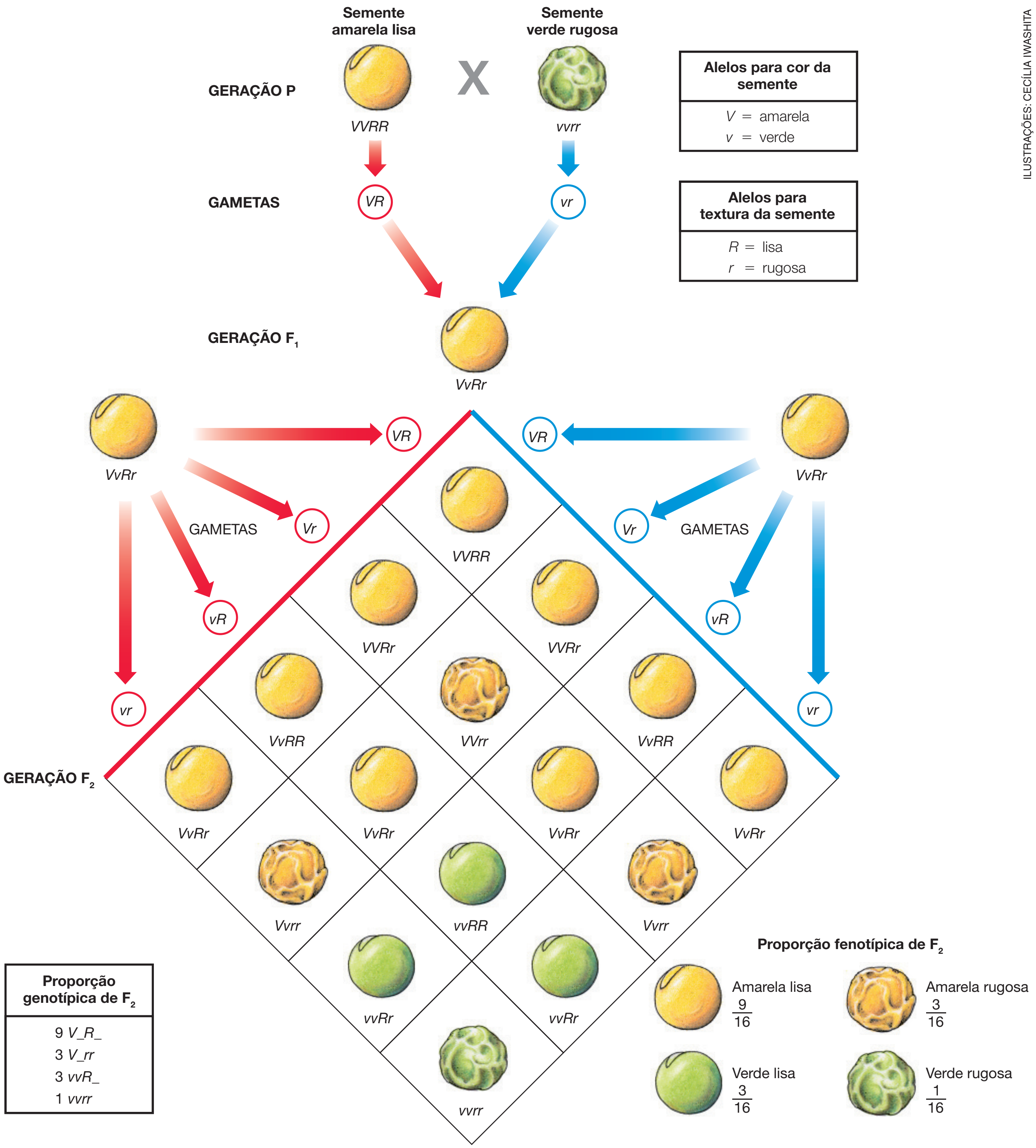

MARTIN SHIELDS/
SCIENCE SOURCE/LATINSTOCK

Figura 2.1 Sementes de ervilha com fenótipo verde: à esquerda, semente rugosa e, à direita, semente lisa. Cada semente de ervilha mede, aproximadamente, 1 cm de diâmetro.

Na formação dos gametas de plantas híbridas da geração F_1, os alelos para a cor da semente (*V* e *v*) separam-se independentemente dos alelos que condicionam a textura da semente (*R* e *r*). Ou seja, os gametas portadores de um alelo *V* podem conter tanto um alelo *R* como um alelo *r*, com iguais chances; o mesmo vale para os gametas portadores do alelo *v*, que podem receber com iguais chances o alelo *R* e o alelo *r*.

Segundo essa explicação, uma planta duplo-heterozigótica *VvRr* forma quatro tipos de gameta em igual proporção: 1 *VR* : 1 *Vr* : 1 *vR* : 1 *vr*. A combinação ao acaso desses gametas é o que explica a proporção 9 : 3 : 3 : 1, observada na geração F_2 dos cruzamentos. (Fig. 2.2)


Semente amarela lisa
Semente verde rugosa
GERAÇÃO P
X
VVRR
vvrr
GAMETAS
VR
vr
Alelos para cor da semente
V = amarela
v = verde
Alelos para textura da semente
R = lisa
r = rugosa
GERAÇÃO F1
VvRr
VvRr
VvRr
VR
Vr
vR
vr
GAMETAS
VR
Vr
vR
vr
GAMETAS
VVRR
VVRr
VVRr
VvRR
VVrr
VvRR
GERAÇÃO F2
VvRr
VvRr
VvRr
VvRr
Vvrr
vvRR
Vvrr
vvRr
vvRr
vvrr
Proporção genotípica de F2
9 V_R_
3 V_rr
3 vvR_
1 vvrr
Proporção fenotípica de F2
Amarela lisa 9/16
Amarela rugosa 3/16
Verde lisa 3/16
Verde rugosa 1/16

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Figura 2.2 Representação esquemática do cruzamento entre linhagens puras de ervilhas de semente amarela lisa e de semente verde rugosa e do cruzamento entre indivíduos da geração F_1. Os genes que condicionam as características cor (amarela ou verde) e textura (lisa ou rugosa) das sementes segregam-se independentemente.

Esse princípio que rege a separação dos genes foi chamado, por Mendel, de **lei da segregação independente**. Posteriormente, em merecida homenagem ao geneticista pioneiro, ela passou a também ser denominada segunda lei de Mendel. Seu enunciado é: “Os fatores para duas ou mais características separam-se no híbrido, distribuindo-se independentemente para os gametas”.

No início do século XX, os geneticistas constataram que a segregação independente de genes ocorria em diversas espécies. Por exemplo, nas cobaias, ou porquinhos-da-índia (*Cavia porcellus*), a pelagem preta é dominante sobre a pelagem marrom, e a pelagem curta é dominante sobre a pelagem longa. Os cruzamentos mostram que os genes responsáveis por essas características segregam-se independentemente. Quando cobaias pretas de pelo curto duplo-heterozigóticas se cruzam, os fenótipos da descendência distribuem-se na proporção de 9 : 3 : 3 : 1. (Fig. 2.3)

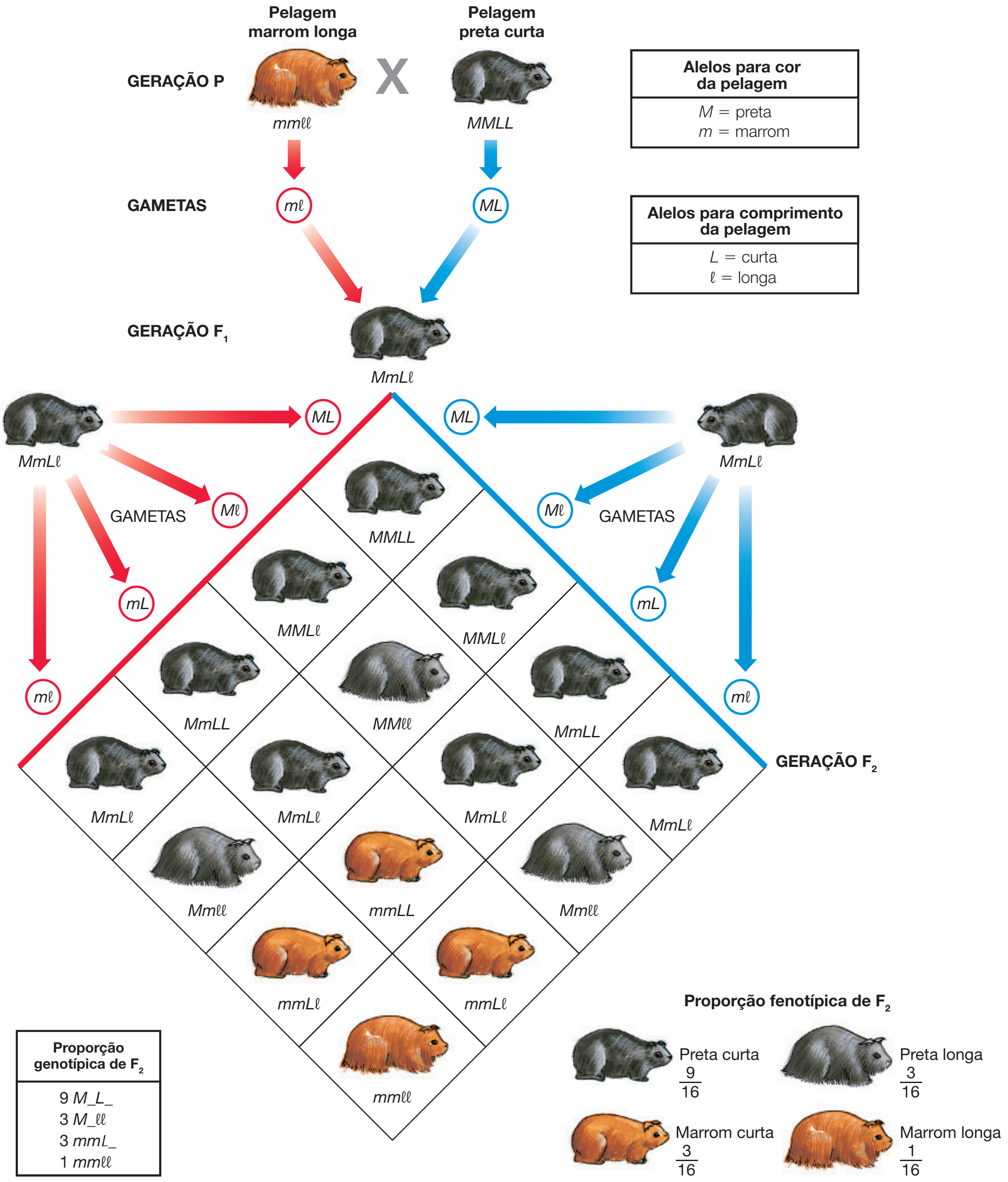

Pelagem marrom longa
Pelagem preta curta
GERAÇÃO P
X
mmℓℓ
MMLL
Alelos para cor da pelagem
M = preta
m = marrom
GAMETAS
mℓ
ML
Alelos para comprimento da pelagem
L = curta
ℓ = longa
GERAÇÃO F1
MmLℓ
MmLℓ
ML
ML
MmLℓ
GAMETAS
Mℓ
Mℓ
GAMETAS
mL
mL
mℓ
mℓ
MMLL
MMLℓ
MMLℓ
MmLL
MMℓℓ
MmLL
MmLℓ
MmLℓ
MmLℓ
MmLℓ
GERAÇÃO F2
Mmℓℓ
mmLL
Mmℓℓ
mmLℓ
mmLℓ
mmℓℓ
Proporção genotípica de F2
9 M_L_
3 M_ℓℓ
3 mmL_
1 mmℓℓ
Proporção fenotípica de F2
Preta curta 9/16
Preta longa 3/16
Marrom curta 3/16
Marrom longa 1/16

Figura 2.3 Representação esquemática do cruzamento entre cobaias (porquinhos-da-índia) de pelagem marrom longa e de pelagem preta curta e do cruzamento entre indivíduos da geração F_1. Os genes que condicionam as características cor (preta ou marrom) e comprimento (curta ou longa) da pelagem segregam-se independentemente.

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

A base celular da segregação independente: meiose

Como mencionamos na apresentação do capítulo, ao estudar a meiose em gafanhotos, Walter Sutton observou que os cromossomos se segregavam da mesma maneira que o previsto para os fatores mendelianos. Isso o levou a supor que os cromossomos representam a base física da herança.

A segregação independente de dois genes ocorre quando eles se situam em diferentes pares de cromossomos homólogos. Na meiose, que leva à formação dos gametas, os cromossomos homólogos separam-se com total independência uns dos outros. Vejamos como isso acontece.

Considere uma célula duplo-heterozigótica *AaBb*, na qual o par de alelos *Aa* situa-se em um par de homólogos e os alelos *Bb* situam-se em outro par de homólogos. Durante a divisão meiótica, os membros de cada par de cromossomos homólogos emparelham-se e orientam-se em direção a polos opostos da célula. Duas situações, então, podem ocorrer:

1) o cromossomo portador do alelo dominante *A* orienta-se para o mesmo polo que o cromossomo portador do alelo dominante *B*; consequentemente, o cromossomo portador do alelo recessivo *a* orienta-se para o mesmo polo que o cromossomo portador do alelo recessivo *b*;

2) o cromossomo portador do alelo dominante *A* orienta-se para o mesmo polo que o cromossomo portador do alelo recessivo *b*; consequentemente, o cromossomo portador do alelo dominante *B* orienta-se para o mesmo polo que o cromossomo portador do alelo recessivo *a*.

Cada célula em meiose tem uma ou outra situação. Se ocorre a situação **1**, formam-se dois tipos de gameta quanto a esses genes: *AB* e *ab*. Se ocorre a situação **2**, formam-se outros dois tipos de gameta: *Ab* e *aB*.

A chance de ocorrer cada uma dessas situações é a mesma. Espera-se que em aproximadamente metade das células em meiose ocorra a primeira situação, com produção de gametas *AB* e *ab*, enquanto na outra metade ocorra a segunda situação, com produção de gametas *Ab* e *aB*. Assim, um indivíduo heterozigótico para dois genes *AaBb*, localizados em pares diferentes de cromossomos, produz quatro tipos de gametas haploides com as quatro combinações gênicas na mesma proporção: 1 *AB* : 1 *Ab* : 1 *aB* : 1 *ab*. (Fig. 2.4)

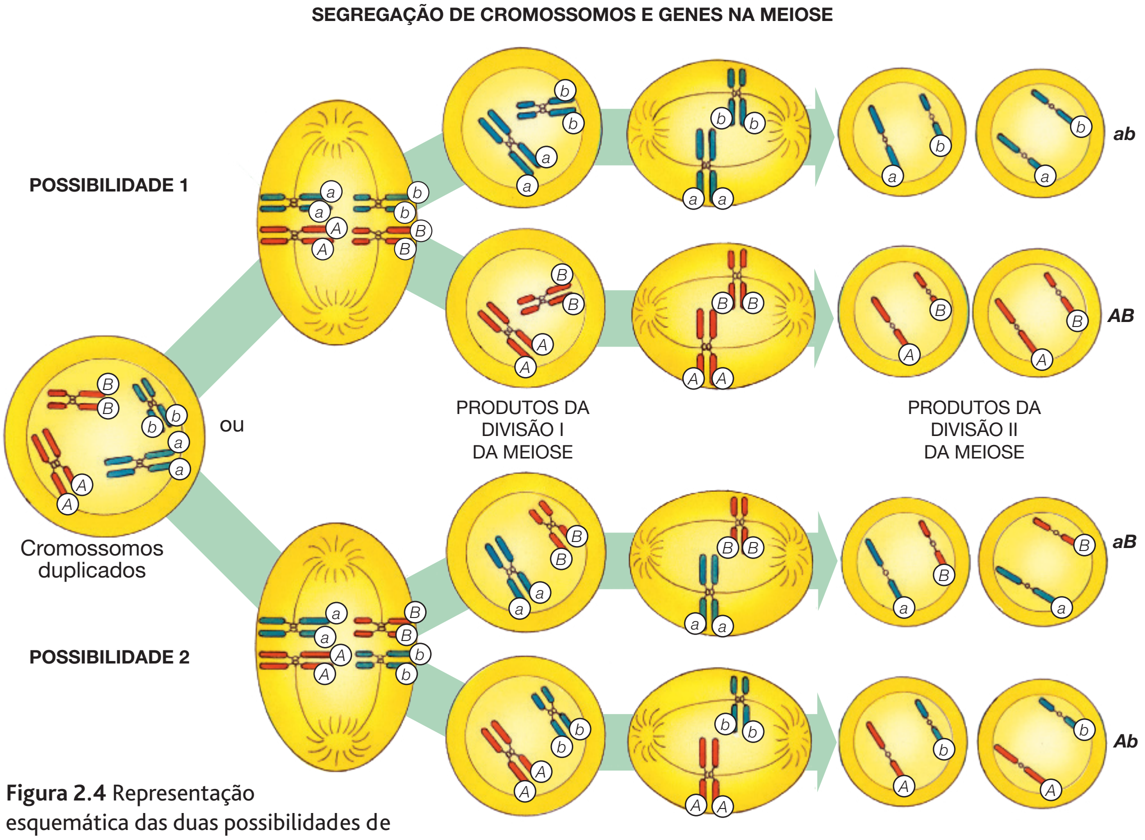

SEGREGAÇÃO DE CROMOSSOMOS E GENES NA MEIOSE
POSSIBILIDADE 1
ou
POSSIBILIDADE 2
Cromossomos duplicados
PRODUTOS DA DIVISÃO I DA MEIOSE
PRODUTOS DA DIVISÃO II DA MEIOSE
ab
AB
aB
Ab
A
a
B
b

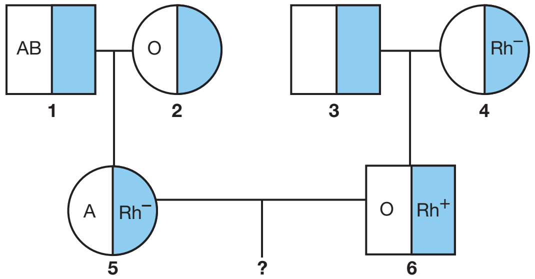
Figura 2.4 Representação esquemática das duas possibilidades de migração de dois pares de cromossomos, que leva à segregação independente dos alelos *A*/*a* e *B*/*b* na meiose. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

JURANDIR RIBEIRO

Segregação independente de genes para os grupos sanguíneos ABO e Rh

O problema

O heredograma a seguir representa uma família estudada quanto aos grupos sanguíneos do sistema ABO e do sistema Rh. Na árvore, o símbolo que representa as pessoas – quadrado para homem e círculo para mulher – é dividido por um traço vertical, com o lado esquerdo representando o fenótipo para o sistema ABO e o lado direito representando o fenótipo para o sistema Rh.



ADILSON SECCO

Sobre essa família, pergunta-se:

a) Qual é a probabilidade de um filho do casal 5 × 6 ter sangue dos tipos O/Rh^+ ou A/Rh^-?

b) Quando o homem 6 ainda era noivo da mulher 5, uma antiga namorada O/Rh^+ acusou-o de ser pai de seu filho, uma criança A/Rh^-. Pelo que se conhece sobre herança dos grupos sanguíneos, essa acusação tem procedência?

A solução

Em primeiro lugar, é preciso determinar os genótipos dos indivíduos 5 e 6 aos quais se refere o problema. A mulher 5 tem sangue Rh^- e, portanto, seu genótipo é *rr*. Como ela tem sangue do tipo A, um de seus alelos é I^A. Como a mãe da mulher 5 tem sangue tipo O (*ii*), ela só pode ter fornecido à filha um alelo *i*. O genótipo da mulher 5 é, portanto, I^Airr.

Para determinar o genótipo do homem 6, o raciocínio é o mesmo: como seu fenótipo é O/Rh^+ (*iiR_*) e sua mãe é Rh^- (*rr*), concluímos que ele tem genótipo *iiRr*.

Com relação ao sistema ABO, a mulher 5 forma dois tipos de gameta: $\frac{1}{2}\ I^A$ e $\frac{1}{2}\ i$. O homem 6 forma apenas um tipo de gameta, *i*. Desse modo, os filhos desse casal poderão ter sangue do tipo A $\left(\frac{1}{2}\ I^A \times 1\ i\right)$ ou do tipo O $\left(\frac{1}{2}\ i \times 1\ i\right)$, com 50% $\left(\frac{1}{2}\right)$ de chance para cada tipo.

Quanto ao sistema Rh, a mulher 5 forma apenas um tipo de gameta, *r*. O homem 6 forma gametas de dois tipos: $\frac{1}{2}$ R e $\frac{1}{2}$ *r*. Assim, os filhos do casal poderão ter sangue Rh^+ $\left(1\ r \times \frac{1}{2}\ R\right)$ ou Rh^- $\left(1\ r \times \frac{1}{2}\ r\right)$, com 50% $\left(\frac{1}{2}\right)$ de chance para cada tipo.

Sabendo-se que os alelos que condicionam esses dois grupos sanguíneos segregam-se independentemente, a herança simultânea das duas características pode ser calculada multiplicando-se as probabilidades individuais:

- Probabilidade de um filho vir a ser O/Rh^+ = $= \frac{1}{2}\ (O) \times \frac{1}{2}\ (Rh^+) = \frac{1}{4}$
- Probabilidade de um filho vir a ser A/Rh^- = $= \frac{1}{2}\ (A) \times \frac{1}{2}\ (Rh^-) = \frac{1}{4}$
- Probabilidade de um filho vir a ser O/Rh^+ **ou** A/Rh^- $= \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$

Pode-se também construir o quadrado de Punnett e estimar a probabilidade procurada:

		Gametas formados por 6 (o pai)	
		iR	***ir***
Gametas formados por 5 (a mãe)	I^Ar	I^AiRr (A/Rh^+)	I^Airr (A/Rh^-)
	ir	*iiRr* (O/Rh^+)	*iirr* (O/Rh^-)

Podemos agora responder à segunda pergunta do problema: será que o homem 6 pode ser pai de uma criança A/Rh^-, filha de sua antiga namorada O/Rh^+?

O indivíduo 6 tem genótipo *iiRr*, e a mãe da criança tem genótipo *iiR_*, pois seu sangue é tipo O/Rh^+. Com essas informações, nem é preciso investigar o lado familiar da mãe: se a criança apresenta fenótipo A/Rh^-, ela tem necessariamente um alelo I^A, que só pode ter vindo de seu verdadeiro pai. Este poderia ter sangue tipo A ou AB, mas nunca poderia pertencer ao grupo O.

O homem 6 pode, portanto, ser excluído da suspeita de ser o pai da criança em questão. Como podemos ver, esse tipo de investigação não determina quem é o verdadeiro pai, mas eventualmente permite excluir os que não podem ser; por isso, é chamado de teste de exclusão de paternidade. Atualmente, os testes de exclusão de paternidade pela análise de grupos sanguíneos têm sido substituídos por exames de análise de DNA, mais precisos e conclusivos.

2.2 Interações entre genes com segregação independente

Ainda nos primórdios da Genética, verificou-se que a herança de certas características somente podia ser explicada admitindo-se a atuação conjunta de alelos de dois ou mais genes. Surgiu, então, o conceito de **interação gênica** para designar essas situações. Vejamos alguns exemplos.

Interação gênica na cor da plumagem de periquitos

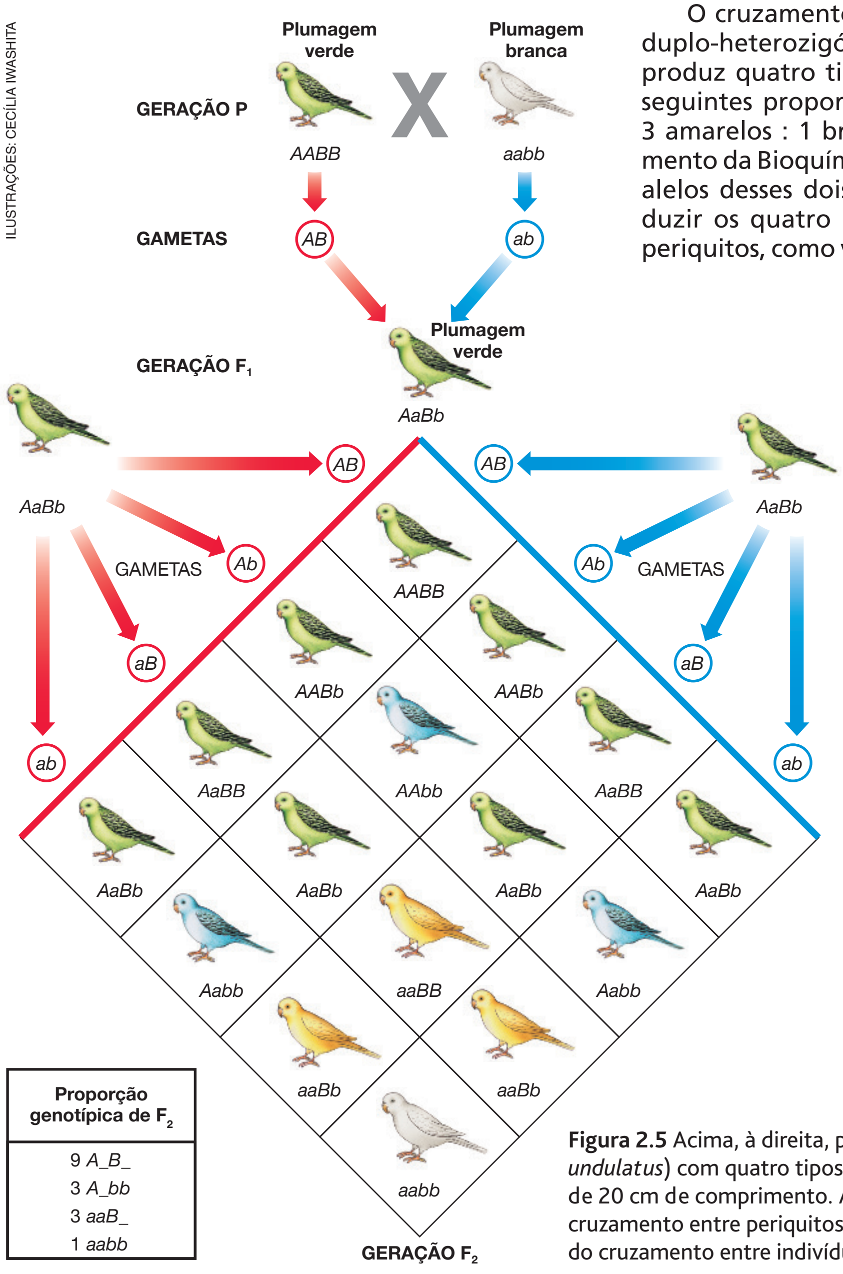
Periquitos-australianos (*Melopsittacus undulatus*) apresentam grande diversidade de cores, determinadas por dezenas de genes. No entanto, a determinação das cores básicas da plumagem dessas aves – verde, azul, amarela e branca – é controlada por dois genes principais com segregação independente, cada qual com dois alelos (*Aa* e *Bb*). Ou seja, esses dois genes para a cor da plumagem do periquito encontram-se em diferentes pares de cromossomos homólogos.

Periquitos homozigóticos recessivos para os dois genes – *aabb* – são brancos. Periquitos homozigóticos recessivos *aa* que apresentam ao menos um alelo dominante *B* – genótipos *aaBB* ou *aaBb* – são amarelos. Periquitos homozigóticos recessivos *bb* que apresentam ao menos um alelo dominante *A* – genótipos *AAbb* ou *Aabb* – são azuis. Periquitos com ao menos um alelo dominante de cada gene – genótipos *AABB*, *AABb*, *AaBB* ou *AaBb* – são verdes.

Lembre sempre aos estudantes que a segregação independente ocorre quando os genes estão situados em cromossomos diferentes. Se o tempo disponível for reduzido, atenha-se a um exemplo mais conhecido, como o da cor da pelagem de cães labradores, que costuma motivar os estudantes.

O cruzamento entre periquitos verdes duplo-heterozigóticos – genótipo *AaBb* – produz quatro tipos de descendentes nas seguintes proporções: 9 verdes : 3 azuis : 3 amarelos : 1 branco. Com o desenvolvimento da Bioquímica, descobriu-se como os alelos desses dois genes atuam para produzir os quatro diferentes fenótipos dos periquitos, como veremos a seguir. (Fig. 2.5)

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA


Plumagem verde
Plumagem branca
GERAÇÃO P
X
AABB
aabb
GAMETAS
AB
ab
Plumagem verde
GERAÇÃO F1
AaBb
AaBb
AaBb
AB
Ab
aB
ab
GAMETAS
AB
Ab
aB
ab
GAMETAS
AABB
AABb
AABb
AaBB
AAbb
AaBB
AaBb
AaBb
AaBb
AaBb
Aabb
aaBB
Aabb
aaBb
aaBb
aabb
GERAÇÃO F2
Proporção genotípica de F2
9 A_B_
3 A_bb
3 aaB_
1 aabb

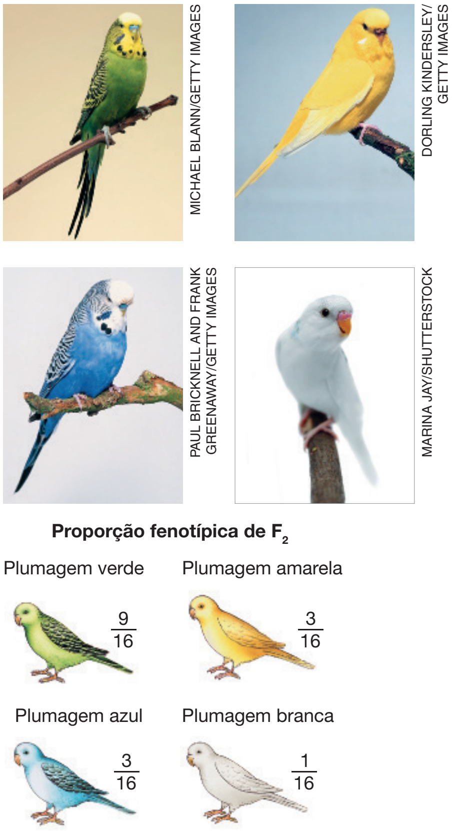

MICHAEL BLANN/GETTY IMAGES
DORLING KINDERSLEY/GETTY IMAGES
PAUL BRICKNELL AND FRANK GREENAWAY/GETTY IMAGES
MARINA JAY/SHUTTERSTOCK
Proporção fenotípica de F2
Plumagem verde
9/16
Plumagem amarela
3/16
Plumagem azul
3/16
Plumagem branca
1/16

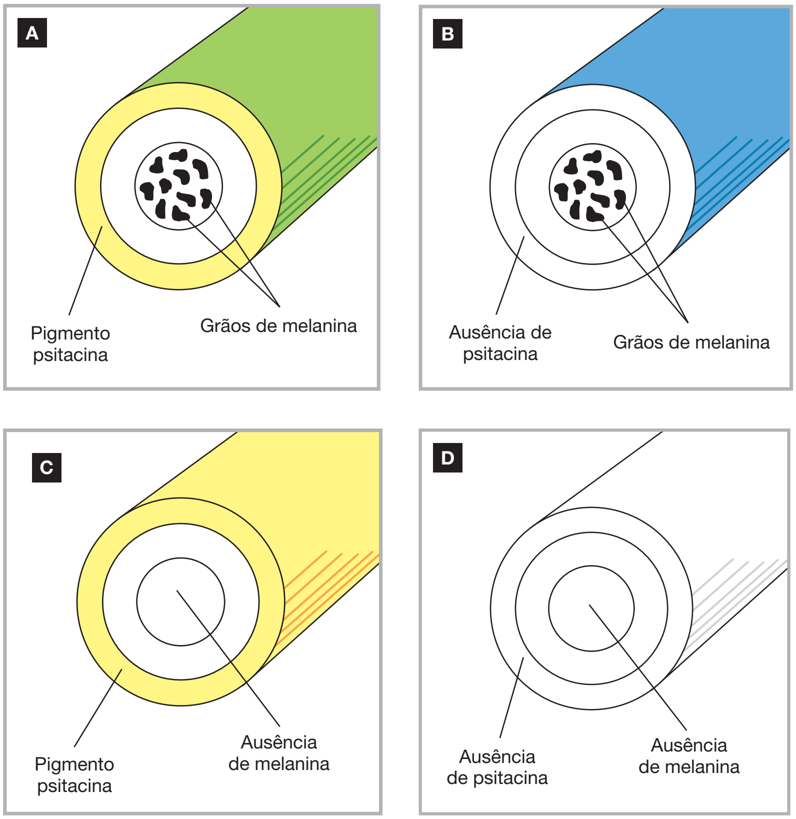
Figura 2.5 Acima, à direita, periquitos-australianos (*Melopsittacus undulatus*) com quatro tipos de plumagem; essas aves medem cerca de 20 cm de comprimento. À esquerda, representação esquemática do cruzamento entre periquitos de plumagem branca e plumagem verde e do cruzamento entre indivíduos da geração F_1.

O alelo *A* contém informação para a produção de melanina, pigmento escuro responsável pela cor azul das penas. O alelo *a*, uma versão alterada e não funcional do gene, não leva à produção de melanina. A presença de melanina em certas porções das penas dispersa a luz azul com mais eficiência, fazendo com que elas se apresentem azuladas. É a chamada “dispersão de Rayleigh”, fenômeno físico em que a luz se espalha ao passar por partículas muito menores do que seu comprimento de onda; a cor azul do céu, por exemplo, decorre da dispersão de Rayleigh da luz solar na atmosfera.

O alelo *B*, localizado em outro par de cromossomos, condiciona a deposição na pena de um pigmento amarelo, a psitacina. O alelo *b*, uma versão alterada desse gene, não leva à deposição do pigmento psitacina na pena.

Periquitos com genótipo *aabb* não têm melanina nem psitacina nas penas, por isso são brancos. Periquitos com ao menos uma versão funcional de cada gene – genótipo geral *A_B_* – têm ambos os pigmentos e as penas são verdes. Essa cor resulta da mistura do efeito azulado da melanina com o amarelo do pigmento psitacina.

Periquitos sem melanina nas penas e com ao menos um alelo funcional para a presença de psitacina – genótipo geral *aaB_* – têm cor amarela. Periquitos com ao menos um alelo funcional do gene para a produção de melanina e homozigóticos para a versão não funcional do gene para a deposição de psitacina – genótipo geral *A_bb* – têm cor azul. (Fig. 2.6)



ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Figura 2.6 Esquemas de cortes transversais das penas de periquitos para mostrar como a presença e a distribuição dos pigmentos melanina e psitacina determinam as diferentes cores da plumagem dessas aves: **A.** verde; **B.** azul; **C.** amarela; **D.** branca. (Elaborados com base em Campbell, N. A. e cols., 1994.) (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Interação gênica na cor dos olhos de seres humanos

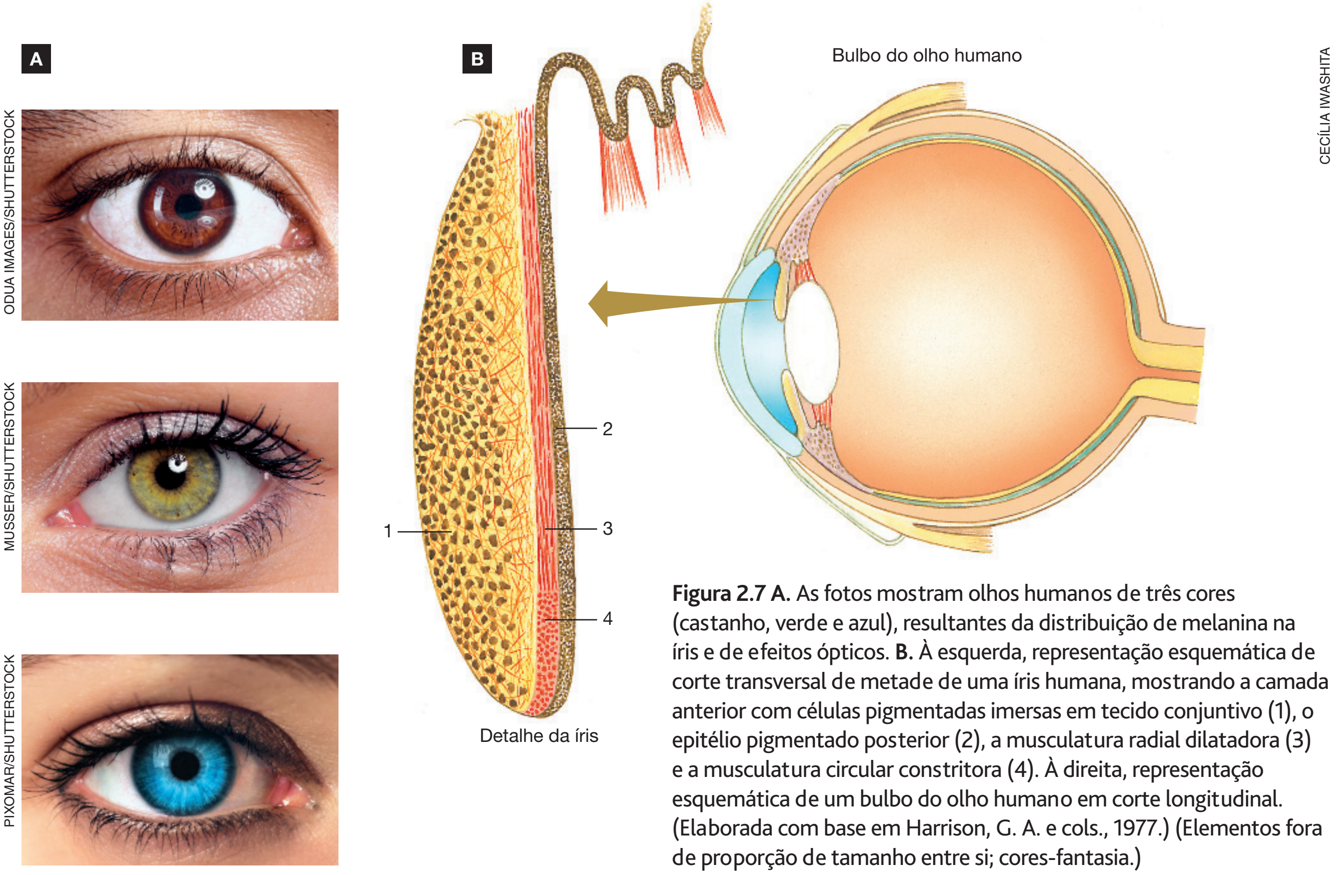
Como surgem as diferentes cores de olhos?

A cor da íris do olho humano varia do cinza e azul-claro ao quase negro, passando por tonalidades de verde e de castanho. Não há pigmentos azuis ou verdes na íris; as diversas cores de olhos são produzidas pela presença de diferentes quantidades de melanina, pigmento marrom-amarelado, e por efeitos físicos.

O olho castanho resulta do acúmulo de células pigmentadas ricas em melanina (melanócitos) na camada de tecido da porção anterior da íris. Os melanócitos absorvem a maior parte da luz incidente e refletem uma certa quantidade de luz marrom-amarelada. O resultado é a cor castanho-escura da íris; quanto mais melanócitos e, consequentemente, mais melanina, mais escuro será o olho.

Nos olhos azuis, há poucos melanócitos na camada anterior da íris; por isso, pouca luz incidente é refletida pelo pigmento como luz marrom-amarelada. A maior parte da luz incidente atravessa a camada quase despigmentada da íris, onde os comprimentos de onda mais curtos (luz azul) são seletivamente dispersos (dispersão de Rayleigh). Esse efeito físico é o responsável pela cor azul do olho. Se a camada anterior da íris contiver uma quantidade intermediária de melanócitos, a luz refletida pelo pigmento de cor marrom-amarelada, combinada à luz azul produzida pelo efeito Rayleigh, resultará na cor verde do olho.

A progressiva diminuição da quantidade de melanina na camada anterior da íris produz a gradação de cores que vão desde o castanho-escuro até o verde e, na quase total ausência do pigmento, do azul ao cinza. (Fig. 2.7)



ODUA IMAGES/SHUTTERSTOCK

NETFALLS – REMY MUSSER/SHUTTERSTOCK

PIXOMAR/SHUTTERSTOCK

CECÍLIA WASHITA

Figura 2.7 A. As fotos mostram olhos humanos de três cores (castanho, verde e azul), resultantes da distribuição de melanina na íris e de efeitos ópticos. **B.** À esquerda, representação esquemática de corte transversal de metade de uma íris humana, mostrando a camada anterior com células pigmentadas imersas em tecido conjuntivo (1), o epitélio pigmentado posterior (2), a musculatura radial dilatadora (3) e a musculatura circular constritora (4). À direita, representação esquemática de um bulbo do olho humano em corte longitudinal. (Elaborada com base em Harrison, G. A. e cols., 1977.) (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Os recém-nascidos de etnia caucasiana apresentam sempre olhos claros, que podem se tornar progressivamente mais escuros à medida que os melanócitos da íris produzem melanina. Os recém-nascidos latinos e de etnias negra e asiática já possuem olhos escuros ao nascer.

A íris não tem estrutura e coloração uniformes; nos olhos claros, a camada anterior é mais fina em certas regiões do que em outras, o que resulta em um padrão radial característico. A melanina também não se distribui homogeneamente, gerando áreas mais pigmentadas e áreas de menor pigmentação. Não é de estranhar, portanto, a dificuldade de classificar com precisão as cores dos olhos humanos e analisar o padrão de herança dessa característica.

Genes envolvidos na determinação da cor dos olhos

Foram identificados dois genes principais que atuam na produção de melanina e que estão envolvidos na determinação da cor dos olhos na espécie humana: o gene *EYCL1*, mais conhecido por *GEY*, localizado no cromossomo 19, e o gene *EYCL3*, mais conhecido por *BEY*, no cromossomo 15.

O gene *GEY* tem dois alelos já bem caracterizados (admite-se que possam existir outros), um dominante (G^V), que condiciona cor verde à íris, e outro recessivo (G^A), que condiciona cor azul. A denominação *GEY* deriva do inglês ***g****reen* ***ey****e color gene*. O gene *BEY* também apresenta dois alelos caracterizados, um dominante (B^M), que condiciona cor castanha (marrom), e outro recessivo (B^A), que condiciona cor azul. A denominação *BEY* deriva do inglês ***b****rown* ***ey****e color gene*.

Com base na identificação desses genes e no estudo de certos padrões de herança da cor dos olhos em algumas famílias, os pesquisadores concluíram que esses dois genes apresentam interação, sendo que o alelo que condiciona a cor castanha do gene *BEY* (B^M) tem um efeito "dominante" sobre os alelos do gene *GEY*. De acordo com esse modelo, a pessoa portadora de pelo menos um alelo B^M terá olhos castanhos. Para ter olhos azuis, a pessoa precisa ser homozigótica recessiva quanto aos dois genes B^AB^A/G^AG^A. Pessoas homozigóticas recessivas quanto ao gene *BEY* com, pelo menos, um alelo dominante para o gene *GEY* ($B^AB^A/G^V\_$) terão olhos verdes. (Tab. 2.1)

TABELA 2.1 GENÓTIPOS E FENÓTIPOS QUANTO AOS GENES *BEY* E *GEY* PARA COR DOS OLHOS

Genótipos	Fenótipos
B^MB^M/G^VG^V, B^MB^M/G^VG^A, B^MB^M/G^AG^A	Olhos castanhos
B^MB^A/G^VG^V, B^MB^A/G^VG^A, B^MB^A/G^AG^A	
B^AB^A/G^VG^V, B^AB^A/G^VG^A	Olhos verdes
B^AB^A/G^AG^A	Olhos azuis

Já foi identificado um terceiro gene, *EYCL2* ou *BEY1*, localizado também no cromossomo 15, que contribui para a cor castanha da íris. Acredita-se que possam existir outros genes que interferem na ação dos já identificados. Apesar de todos os avanços da ciência em relação ao conhecimento do genoma humano, a herança da cor dos olhos ainda não está completamente esclarecida.

Interação gênica na forma da crista de galináceos

Outro exemplo clássico de interação gênica é a herança da forma da crista em certas raças de galináceos (*Gallus gallus domesticus*), em que a crista pode ser de quatro tipos: ervilha, simples, noz e rosa. (Fig. 2.8)

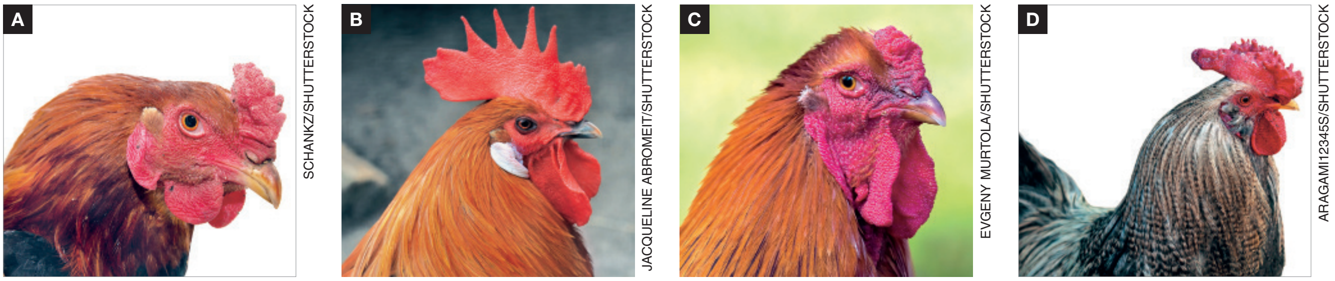

A
SCHANKZ/SHUTTERSTOCK
B
JACQUELINE ABROMEIT/SHUTTERSTOCK
C
EVGENY MURTOLA/SHUTTERSTOCK
D
ARAGAMI12345S/SHUTTERSTOCK

Figura 2.8 A forma da crista de certas raças de galináceos pode ser: **A.** ervilha; **B.** simples; **C.** noz; **D.** rosa. Essa característica é determinada pela interação de dois pares de alelos com segregação independente. Os animais podem atingir até 60 cm de comprimento.

Em 1905, em uma série de cruzamentos bem planejados, o geneticista inglês William Bateson (1861-1926) e seus colaboradores concluíram que os quatro tipos de crista de certas raças de galináceos resultam da interação entre dois pares de alelos com segregação independente, ou seja, localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos. Acompanhe os resultados desses experimentos e sua interpretação.

Quando aves puras de crista ervilha são cruzadas com aves puras de crista simples, a geração F_1 é constituída apenas por aves de crista ervilha. No experimento original de Bateson, as aves de crista ervilha obtidas nessa F_1 foram cruzadas entre si, e a descendência foi de 332 aves de crista ervilha e 110 de crista simples, proporção muito próxima a 3 : 1. Concluiu-se que crista ervilha é dominante sobre crista simples.

Em outra série de cruzamentos, aves puras de crista rosa foram cruzadas com aves puras de crista simples; a geração F_1 foi constituída apenas por aves de crista rosa. Quando as aves dessa F_1 foram cruzadas entre si, obteve-se uma geração F_2 constituída por 221 aves de crista rosa e 83 de crista simples, proporção igualmente próxima a 3 : 1. Concluiu-se que crista rosa é dominante sobre crista simples. (Fig. 2.9)

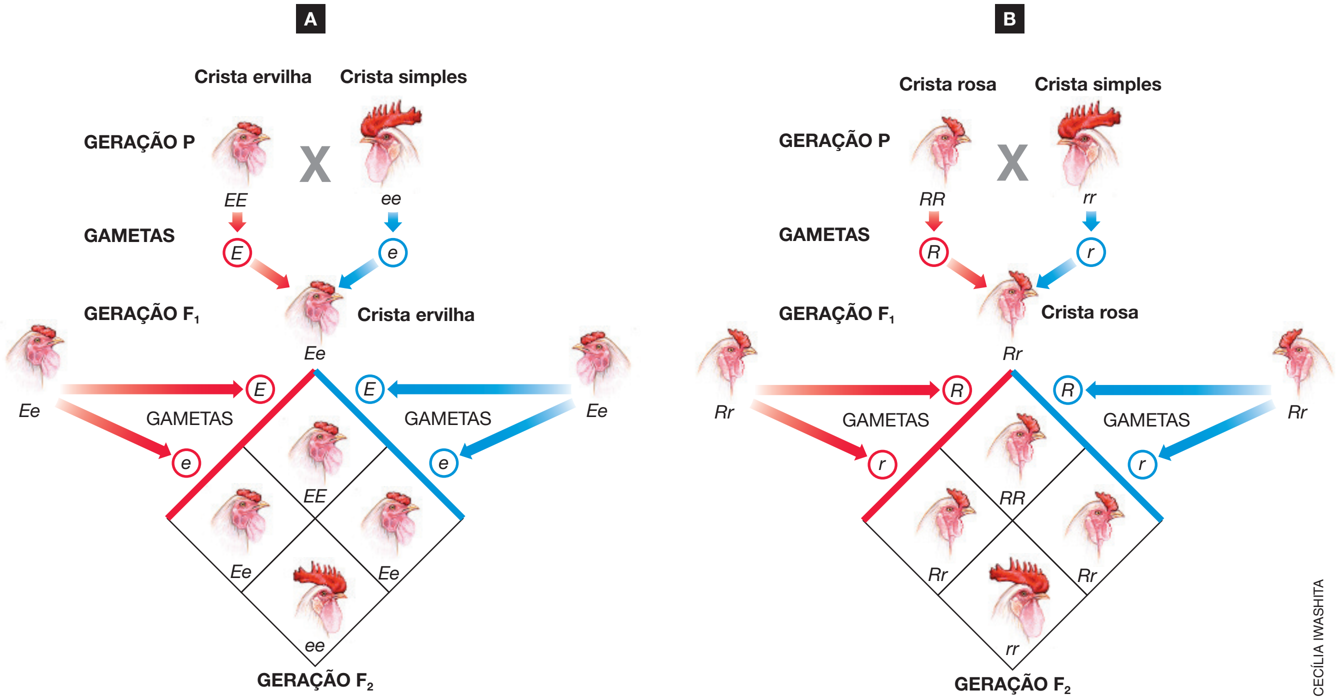


Figura 2.9 Representação esquemática de cruzamentos entre galináceos com diferentes tipos de crista. **A.** Cruzamento entre aves de crista ervilha e de crista simples. **B.** Cruzamento entre aves de crista rosa e de crista simples.

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

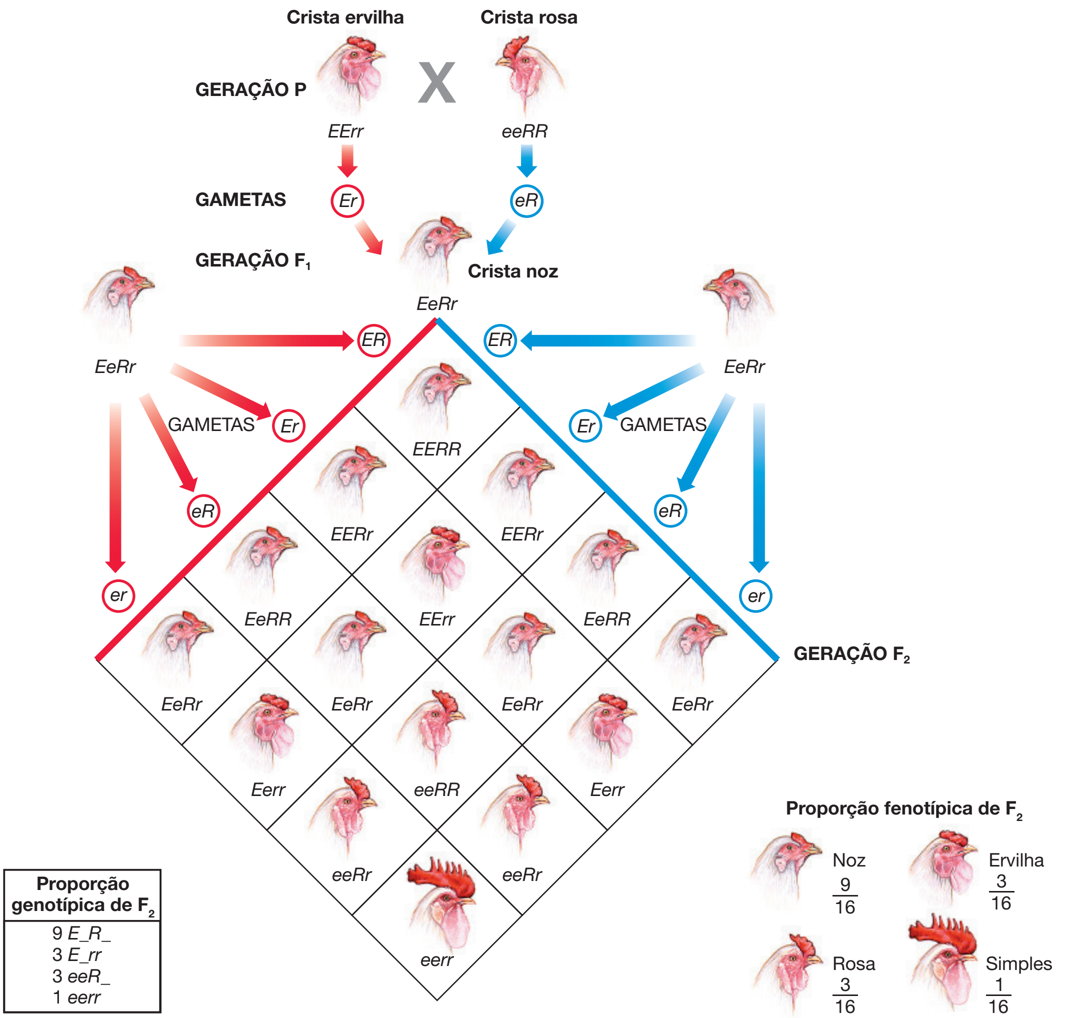
Quando aves puras de crista rosa são cruzadas com aves puras de crista ervilha, toda a descendência apresenta um único tipo de crista – noz –, diferente das cristas das aves genitoras. No experimento de Bateson, quando as aves de crista noz dessa F_1 foram cruzadas entre si, a geração F_2 apresentou 99 aves de crista noz, 26 de crista rosa, 38 de crista ervilha e 16 de crista simples, proporção próxima a 9 : 3 : 3 : 1. Como vimos, essa é a proporção esperada no cruzamento de indivíduos duplo-heterozigóticos quanto a dois genes que se segregam independentemente.

Para avaliar melhor os resultados, a equipe de Bateson realizou o que os geneticistas denominam **cruzamento-teste**, já mencionado no capítulo anterior. Esse cruzamento consiste em cruzar indivíduos com fenótipo dominante, cujo genótipo se deseja determinar, com indivíduos com fenótipo recessivo e, portanto, homozigóticos. Pela descendência do cruzamento-teste, podem-se descobrir o genótipo dos indivíduos testados e os tipos de gametas que eles produzem.

Quando aves de crista noz da geração F_1 foram submetidas ao cruzamento-teste, isto é, cruzadas com aves de crista simples, obtiveram-se 139 descendentes de crista noz, 142 de crista rosa, 112 de crista ervilha e 141 de crista simples, proporção próxima a 1 : 1 : 1 : 1. Os resultados mostraram que os indivíduos de crista noz de F_1 produzem quatro tipos de gameta em iguais proporções, como o esperado para a segregação independente dos genes em duplo-heterozigóticos *EeRr*.

Ao final da série experimental, a conclusão de Bateson e sua equipe foi que o tipo de crista, nas raças de galináceos estudadas, resulta da interação de dois pares de alelos, *Rr* e *Ee*, que se segregam independentemente.

A interação entre os alelos dominantes *R* e *E* resulta em crista noz. O alelo dominante *R*, ao interagir com o recessivo *e*, resulta em crista rosa. O alelo recessivo *r*, ao interagir com o dominante *E*, resulta no fenótipo crista ervilha. Os alelos recessivos *r* e *e*, ao interagirem, produzem o fenótipo crista simples. (Fig. 2.10)

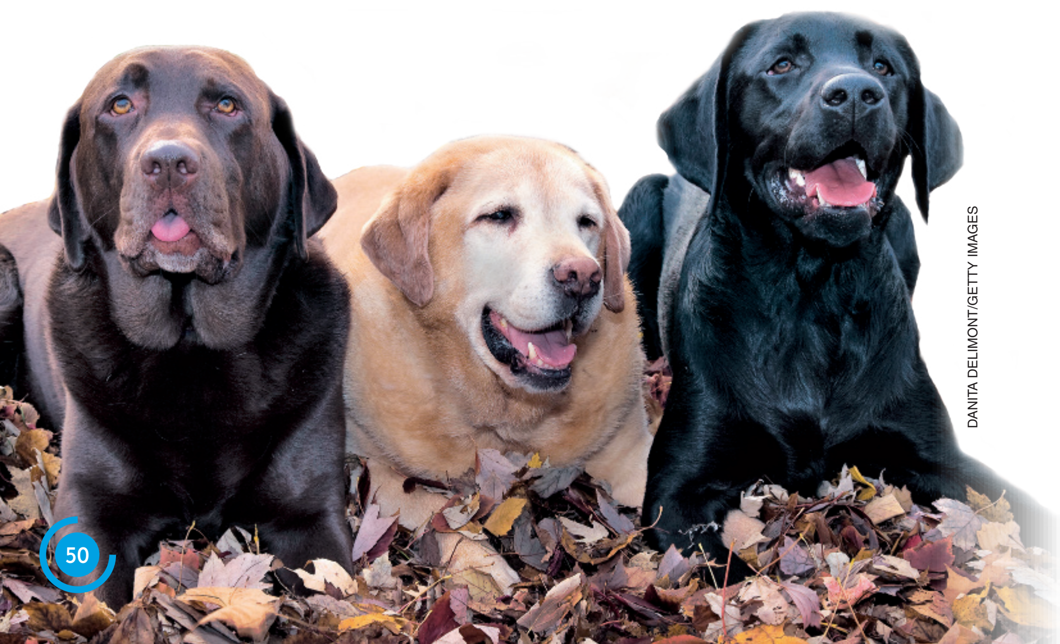

Crista ervilha
Crista rosa
GERAÇÃO P
X
EErr
eeRR
GAMETAS
Er
eR
GERAÇÃO F_1
Crista noz
EeRr
EeRr
EeRr
ER
ER
GAMETAS
Er
Er
GAMETAS
eR
eR
er
er
EERR
EERr
EERr
EeRR
EErr
EeRR
EeRr
EeRr
EeRr
EeRr
Eerr
eeRR
Eerr
eeRr
eeRr
eerr
GERAÇÃO F_2
Proporção genotípica de F_2
9 E_R_
3 E_rr
3 eeR_
1 eerr
Proporção fenotípica de F_2
Noz $\frac{9}{16}$
Ervilha $\frac{3}{16}$
Rosa $\frac{3}{16}$
Simples $\frac{1}{16}$

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Figura 2.10 Representação esquemática do cruzamento entre galináceos de crista rosa e de crista ervilha e do cruzamento entre indivíduos da geração F_1.

Interação gênica na cor da pelagem de cães labradores

Outro exemplo bem estudado de interação gênica é o da cor da pelagem de cães labradores (*Canis lupus familiaris*) – preta, chocolate e dourada –, resultante da interação de dois genes com segregação independente, cada um com dois alelos (*Bb* e *Ee*). (Fig. 2.11)



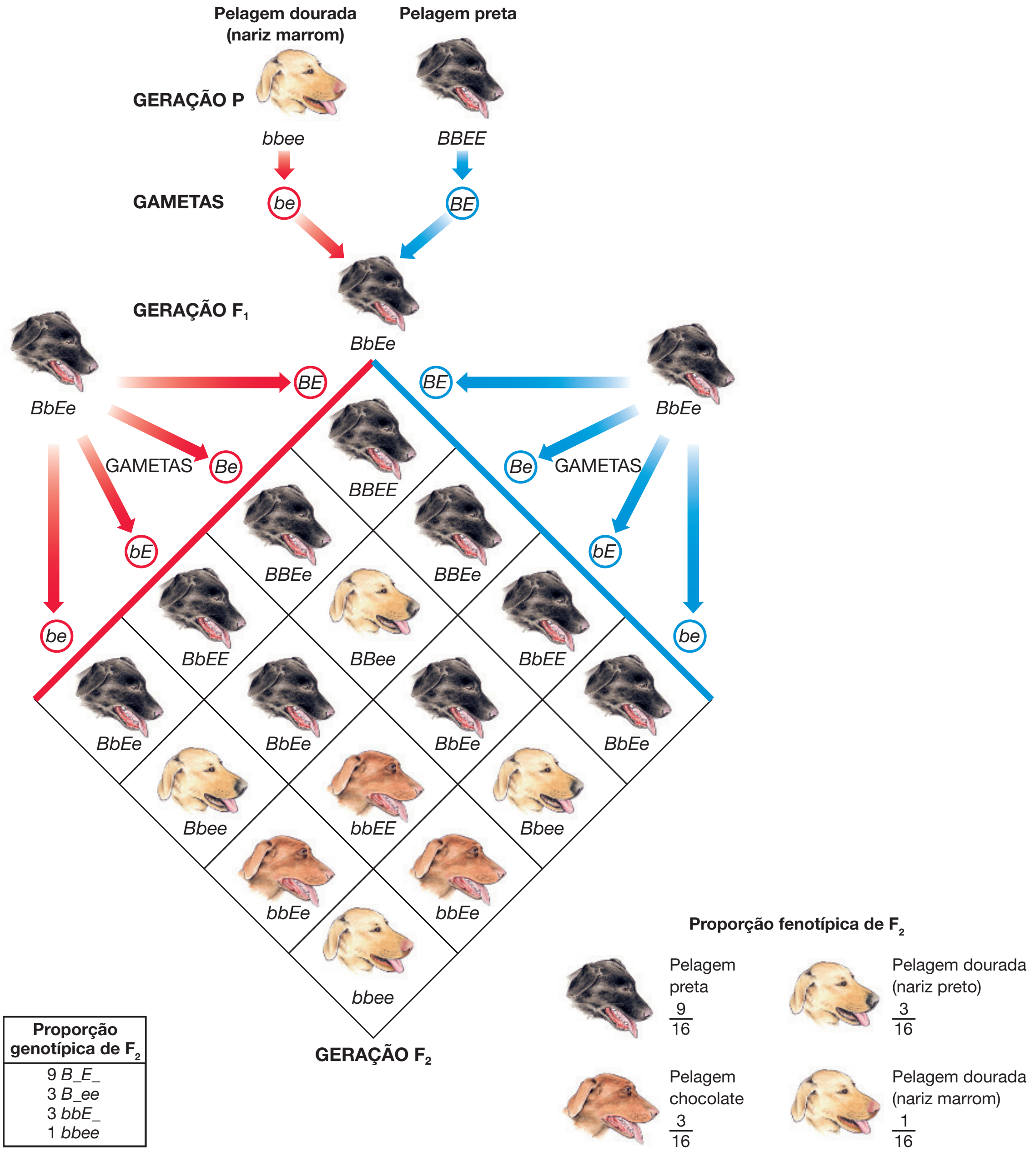
DANITA DELIMONT/GETTY IMAGES

Figura 2.11 Os três tipos de pelagem de cães labradores, da esquerda para a direita: chocolate, dourada e preta. Eles chegam a cerca de 60 cm de altura.

O primeiro gene controla a cor do pigmento formado: o alelo dominante *B* determina a produção de pigmento preto, enquanto o alelo recessivo *b* determina a produção de pigmento chocolate.

O segundo gene controla a deposição de pigmento nos pelos. O alelo dominante *E* condiciona a deposição normal de pigmentos, enquanto o alelo recessivo *e* não atua na deposição. Cães homozigóticos recessivos para esse gene não depositam pigmentos nos pelos e sua pelagem é dourada, sejam quais forem os alelos do outro par – *B_ee* ou *bbee*; na prática, é como se o alelo *e* em homozigose impedisse a ação do gene responsável pela produção dos pigmentos preto ou marrom.

Cães com ao menos um alelo funcional do gene para a deposição de pigmento terão pelagem preta, no caso de possuírem genótipo *B_E_*, ou chocolate, se o genótipo for *bbE_*. Observe, a seguir, cruzamentos entre duas linhagens de labradores que diferem quanto à cor da pelagem. (Fig. 2.12)


Pelagem dourada (nariz marrom)
Pelagem preta
GERAÇÃO P
bbee
BBEE
GAMETAS
be
BE
GERAÇÃO F₁
BbEe
BbEe
BbEe
BE
BE
GAMETAS
Be
Be
GAMETAS
bE
bE
be
be
BBEE
BBEe
BBEe
BbEE
BBee
BbEE
BbEe
BbEe
BbEe
BbEe
Bbee
bbEE
Bbee
bbEe
bbEe
bbee
GERAÇÃO F₂
Proporção fenotípica de F₂
Pelagem preta 9/16
Pelagem dourada (nariz preto) 3/16
Pelagem chocolate 3/16
Pelagem dourada (nariz marrom) 1/16

Proporção genotípica de F_2
9 *B_E_*
3 *B_ee*
3 *bbE_*
1 *bbee*

Figura 2.12 Representação esquemática do cruzamento entre cães labradores de pelagem dourada (nariz marrom) e de pelagem preta e do cruzamento entre indivíduos da geração F_1. Note que a proporção na geração F_2 é 9 com pelagem preta : 3 com pelagem chocolate : 4 com pelagem dourada. Cães com pelagem dourada portadores do alelo *B* têm nariz preto, enquanto os portadores de genótipo *bb* têm nariz marrom.

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

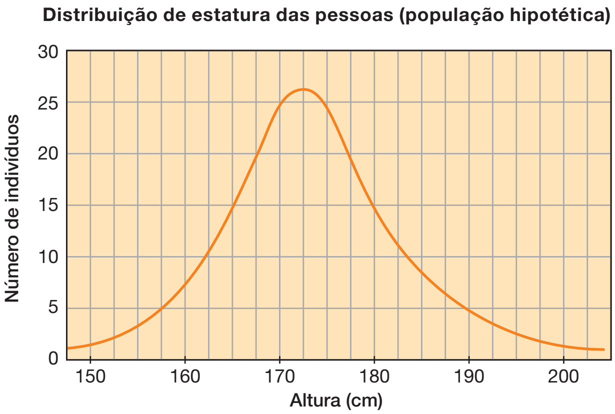
O cruzamento entre cães pretos de genótipo *BBEE* e cães dourados de genótipo *bbee* produz, em F_1, apenas cães pretos (*BbEe*). O cruzamento dos cães pretos duplo-heterozigóticos de F_1 (*BbEe*) produz a seguinte proporção na descendência: 9 pretos (*B_E_*) : 3 chocolate (*bbE_*) e 4 dourados (_ _*ee*).

Note que cães dourados descendentes do cruzamento entre labradores duplo-heterozigóticos podem ter genótipos *BBee* $\left(\frac{1}{4}\right)$, *Bbee* $\left(\frac{2}{4}\right)$ ou *bbee* $\left(\frac{1}{4}\right)$. Destes, os portadores do alelo *B* produzem pigmento preto, que não se deposita no pelo devido ao genótipo *ee*. Assim, a pelagem dos cães com genótipo *B_ee* é dourada, mas os lábios e o nariz desses cães são pretos, pois o alelo *e* não interfere na pigmentação desses locais. Cães homozigóticos *bb* produzem pigmento marrom em vez de preto, mas este também não se deposita nos pelos devido ao genótipo *ee*. A pelagem desses cães é dourada, mas seus lábios e nariz são marrons. Portanto, dos $\frac{4}{16}$ de descendentes com pelagem dourada de F_2, $\frac{3}{16}$ têm lábios e nariz pretos e $\frac{1}{16}$ tem lábios e nariz marrons.

Herança quantitativa ou poligênica

Muitas características dos seres vivos, entre elas a altura, a massa corpórea, a cor etc., resultam do efeito acumulado de vários genes, cada um contribuindo com uma parcela no fenótipo, o que caracteriza um padrão de herança denominado **herança quantitativa**, ou herança poligênica.

Em geral, nesse tipo de herança, o ambiente também exerce forte influência na manifestação dos fenótipos. Por exemplo, a estatura na espécie humana segue a herança quantitativa; há pessoas muito altas e outras muito baixas, mas a maioria tem estatura intermediária. Pessoas que acumulam maior número de alelos dominantes para altura são mais altas. Entretanto, essa característica é muito influenciada pelo ambiente; pessoas com mesmo genótipo podem ter alturas diferentes em consequência, por exemplo, da alimentação, do grau de atividade física ou de doenças que tiveram durante a fase de crescimento. O gráfico de distribuição da estatura das pessoas de uma população é uma curva em forma de sino, conhecida como **curva de distribuição normal**. (Fig. 2.13)



ADILSON SECCO

Figura 2.13 Características condicionadas por vários genes com efeito cumulativo, cuja expressão geralmente sofre influência ambiental, distribuem-se em uma curva normal em forma de sino. No exemplo citado no texto, a estatura média estaria situada no centro da curva, onde se concentra o maior número de pessoas da população.

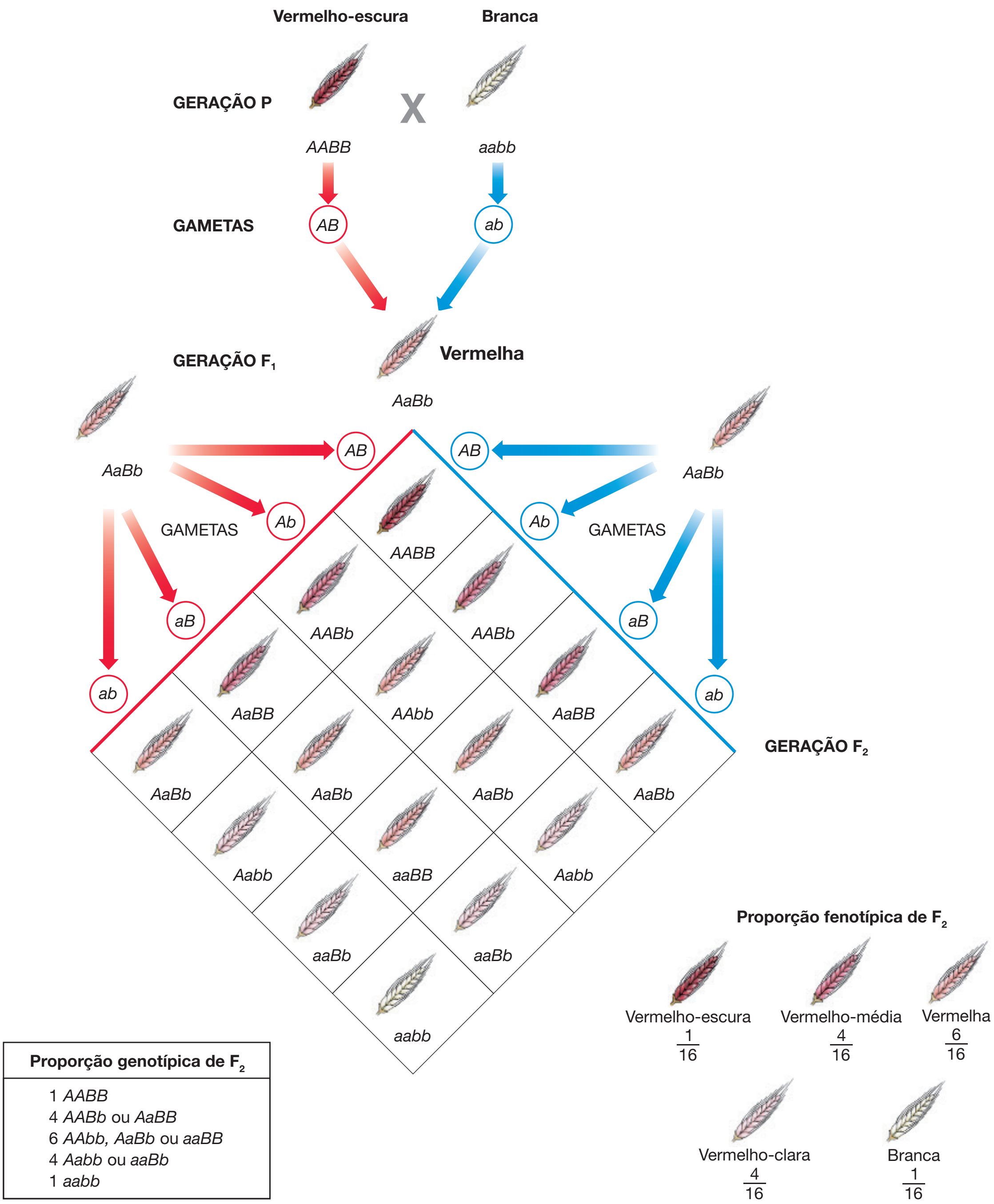
Um exemplo de herança quantitativa

No princípio, a herança das características quantitativas trouxe muitas dificuldades aos geneticistas, e alguns imaginaram que as leis de Mendel não se aplicavam nesses casos. Em 1910, o geneticista sueco Herman Nilsson-Ehle (1873-1949), ao estudar a herança da cor do grão de trigo (gênero *Triticum*), estabeleceu os princípios da herança das características quantitativas. Ele mostrou que essa herança segue as leis mendelianas da segregação e que os fenótipos são condicionados por vários genes, cujos alelos têm efeito aditivo.

Em seu experimento, Nilsson-Ehle cruzou linhagens puras de trigo de sementes vermelho-escuras com linhagens puras de sementes brancas. A geração F_1 foi inteiramente constituída por plantas de sementes de um vermelho mais claro que o do tipo parental. A autofecundação das plantas de F_1 produziu uma geração F_2 constituída por sementes classificadas em cinco categorias: vermelho-escura, vermelho-média, vermelha, vermelho-clara e branca. Esses diversos fenótipos ocorreram, respectivamente, nas frações de $\frac{1}{16} : \frac{4}{16} : \frac{6}{16} : \frac{4}{16} : \frac{1}{16}$ (proporção 1 : 4 : 6 : 4 : 1).

Nilsson-Ehle explicou esses resultados admitindo que a característica cor da semente em trigo é condicionada por dois genes, cada um com dois alelos (*Aa* e *Bb*), que se segregam independentemente, ou seja, localizam-se em diferentes pares de cromossomos homólogos. Cada alelo representado pela letra maiúscula contribui para a produção de pigmento vermelho e seus efeitos se somam; por exemplo, uma semente portadora de quatro alelos para vermelho – genótipo *AABB* – tem coloração vermelho-escura.

Alelos representados por letras minúsculas não contribuem para a coloração. Portanto, uma semente com genótipo *aabb* não tem pigmento algum e é branca. Sementes portadoras de um, dois e três alelos para pigmentação têm cores vermelho-clara, vermelha e vermelho-média, respectivamente. (Fig. 2.14)


Vermelho-escura
Branca
GERAÇÃO P
X
AABB
aabb
GAMETAS
AB
ab
GERAÇÃO F_1
Vermelha
AaBb
AaBb
AaBb
GAMETAS
GAMETAS
AB
Ab
aB
ab
AB
Ab
aB
ab
AABB
AABb
AABb
AaBB
AAbb
AaBB
AaBb
AaBb
AaBb
AaBb
Aabb
aaBB
Aabb
aaBb
aaBb
aabb
GERAÇÃO F_2
Proporção fenotípica de F_2
Vermelho-escura $\frac{1}{16}$
Vermelho-média $\frac{4}{16}$
Vermelha $\frac{6}{16}$
Vermelho-clara $\frac{4}{16}$
Branca $\frac{1}{16}$

Proporção genotípica de F_2

1 *AABB*
4 *AABb* ou *AaBB*
6 *AAbb*, *AaBb* ou *aaBB*
4 *Aabb* ou *aaBb*
1 *aabb*

Figura 2.14 Representação esquemática do cruzamento entre plantas de trigo produtoras de sementes vermelho-escuras e plantas de trigo produtoras de sementes brancas. A proporção fenotípica obtida na geração F_2 mostra que se trata de um caso de herança quantitativa.

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Resolvendo problemas de Genética

Herança quantitativa

O problema

Em uma variedade de cevada, o tamanho médio dos entrenós do caule é de 3,2 centímetros. Em outra variedade, mais baixa, os entrenós têm, em média, 2,1 centímetros.

Um cruzamento entre essas duas variedades produziu uma geração F_1 constituída por plantas de altura intermediária às alturas das plantas parentais, com entrenós, em média, de 2,65 centímetros.

A autofecundação das plantas de F_1 produziu uma geração F_2 constituída por plantas de diferentes alturas, das quais $\frac{1}{16}$ tinha entrenós de 3,2 centímetros, como um dos tipos parentais, e $\frac{1}{16}$ tinha entrenós de 2,1 centímetros, como o outro tipo parental.

Qual é o número provável de genes envolvidos no comprimento dos entrenós dessas duas linhagens de cevada e a contribuição de cada alelo para o fenótipo final?

A solução

A fração $\frac{1}{16}$ para os fenótipos extremos indica tratar-se de uma característica condicionada por dois pares de alelos com segregação independente. Se a diferença entre os tamanhos máximo e mínimo do entrenó é de 1,1 centímetro (3,2 − 2,1) e há 4 alelos envolvidos, pode-se admitir que cada alelo "dominante" acrescenta 0,275 centímetro (1,1 : 4) ao tamanho básico do entrenó:

Genótipos de F_2	Fenótipos (tamanho do entrenó em cm)
aabb	2,100
Aabb ou *aaBb*	2,375
AAbb, AaBb ou *aaBB*	2,650
AABb ou *AaBB*	2,925
AABB	3,200

O cruzamento pode ser sumarizado como na tabela a seguir.

<table>
<tr><td>Geração P</td><td colspan="5"><i>AABB</i>
(3,2 cm)</td><td colspan="5"><i>aabb</i>
(2,1 cm)</td></tr>
<tr><td>Geração F_1</td><td colspan="10">100% <i>AaBb</i>
(2,65 cm)</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Geração F_2</td><td colspan="2" rowspan="6">$\frac{1}{16}$ <i>AABB</i></td><td colspan="2" rowspan="3">$\frac{2}{16}$ <i>AABb</i></td><td colspan="2" rowspan="2">$\frac{1}{16}$ <i>AAbb</i></td><td colspan="2" rowspan="3">$\frac{2}{16}$ <i>Aabb</i></td><td colspan="2" rowspan="6">$\frac{1}{16}$ <i>aabb</i></td></tr>
<tr></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">$\frac{4}{16}$ <i>AaBb</i></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">$\frac{2}{16}$ <i>AaBB</i></td><td colspan="2" rowspan="3">$\frac{2}{16}$ <i>aaBb</i></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">$\frac{1}{16}$ <i>aaBB</i></td></tr>
<tr></tr>
<tr><td>Total em F_2</td><td colspan="2">$\frac{1}{16}$
Quatro alelos dominantes</td><td colspan="2">$\frac{4}{16}$
Três alelos dominantes</td><td colspan="2">$\frac{6}{16}$
Dois alelos dominantes</td><td colspan="2">$\frac{4}{16}$
Um alelo dominante</td><td colspan="2">$\frac{1}{16}$
Nenhum alelo dominante</td></tr>
</table>

2.3 Genes localizados no mesmo cromossomo

Genes localizados em pares diferentes de cromossomos homólogos segregam-se independentemente na meiose. Isso não acontece com genes localizados no mesmo cromossomo, pois eles fazem parte do mesmo filamento cromossômico, ou seja, estão fisicamente ligados. Por isso, diz-se que esses genes apresentam **ligação gênica**, termo derivado do inglês *linkage*, ligação. (Fig. 2.15)

No tema de ligação gênica, não deixe de fazer com os estudantes a simulação do processo meiótico, conforme sugerido no *Faça você mesmo!*. A concretização do processo de segregação de cromossomos e genes por meio de modelos permite localizar pontos de dúvida e concepções equivocadas.

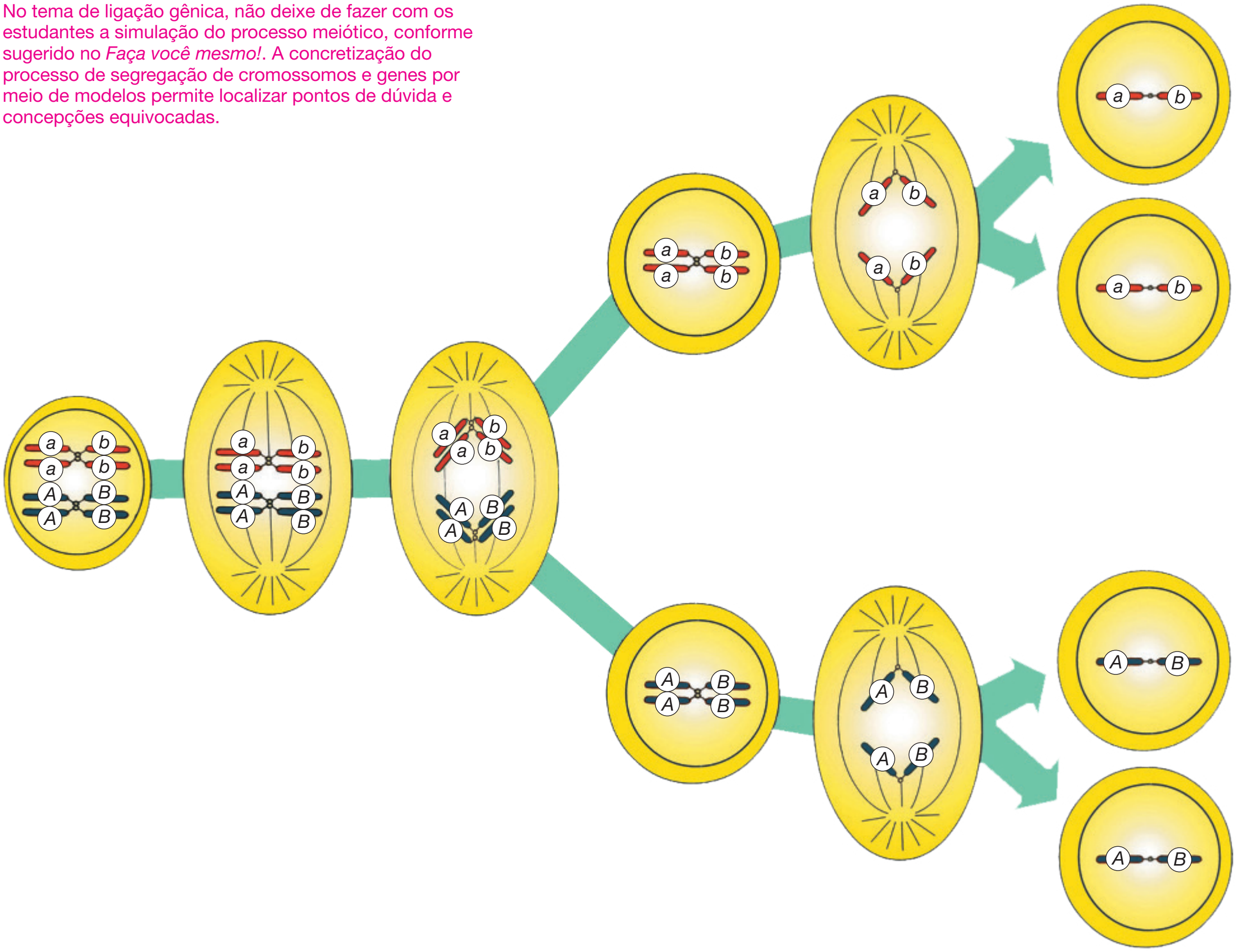


Figura 2.15 Representação esquemática que mostra o comportamento meiótico de dois genes localizados no mesmo cromossomo (*AB*/*ab*). A menos que ocorra o fenômeno da permutação, alelos situados no mesmo cromossomo migram juntos para as células-filhas. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Vamos estudar como exemplo dois genes situados no mesmo cromossomo, portanto, em ligação gênica, na mosca drosófila (*Drosophila melanogaster*); um dos genes controla a cor do corpo e o outro, a forma das asas.

A cor do corpo das drosófilas encontradas na natureza, característica denominada **selvagem**, é cinzento-amarelada. A cor das moscas selvagens é condicionada pelo alelo dominante *P* de um gene, localizado no cromossomo II. Uma mutação ocorrida em laboratório originou o alelo recessivo *p* do gene, que condiciona corpo preto (*black*, em inglês).

Quanto à forma das asas, drosófilas selvagens têm asas alongadas, característica condicionada pelo alelo dominante *V* de um gene, também localizado no cromossomo II. Em consequência, esse gene está fisicamente ligado ao gene para cor do corpo. Uma mutação surgida em laboratório originou o alelo recessivo *v*, que condiciona asas de tamanho reduzido, característica denominada asa vestigial.

Quando fêmeas selvagens puras, com corpo cinzento-amarelado e asas normais – *PPVV* –, são cruzadas com machos de corpo preto e asas vestigiais – *ppvv* –, a geração F_1 é inteiramente constituída por machos e fêmeas com fenótipo selvagem. Fêmeas de F_1, submetidas a cruzamentos-teste com machos de corpo preto e asas vestigiais, produzem quatro tipos de descendente, nas seguintes porcentagens:

- 41,5% de corpo cinzento-amarelado e asas alongadas;
- 41,5% de corpo preto e asas vestigiais;
- 8,5% de corpo cinzento-amarelado e asas vestigiais;
- 8,5% de corpo preto e asas alongadas.

Esses resultados mostram que as fêmeas duplo-heterozigóticas produzem quatro tipos de gameta, nas seguintes porcentagens: 41,5% *PV* : 41,5% *pv* : 8,5% *Pv* : 8,5% *pV*. Os machos, homozigóticos recessivos, produzem um só tipo de gameta, *pv*. (Fig. 2.16)

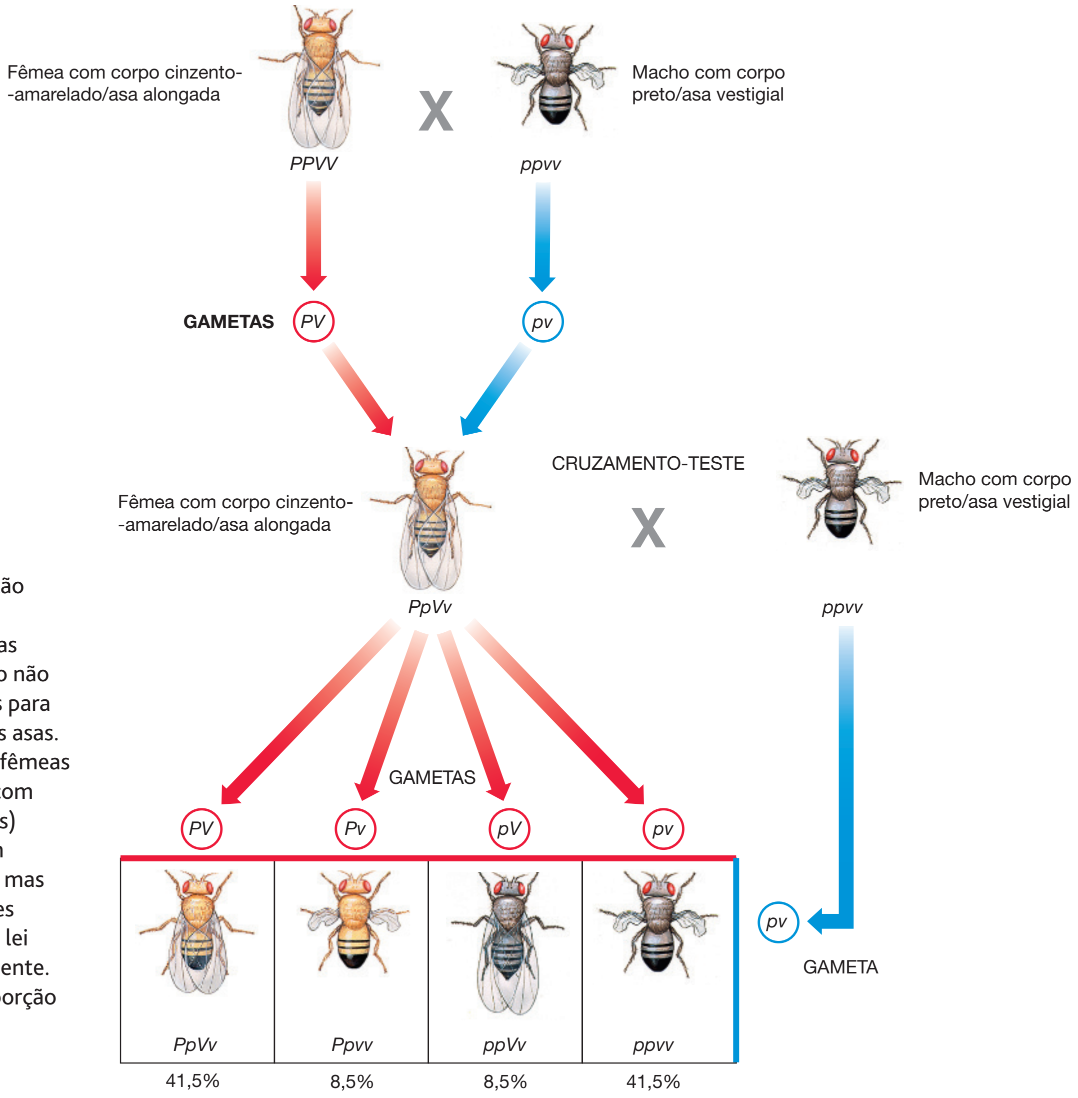

Fêmea com corpo cinzento--amarelado/asa alongada
X
Macho com corpo preto/asa vestigial
PPVV
ppvv
GAMETAS
PV
pv
Fêmea com corpo cinzento--amarelado/asa alongada
CRUZAMENTO-TESTE
X
Macho com corpo preto/asa vestigial
PpVv
ppvv
GAMETAS
PV
Pv
pV
pv
pv
GAMETA
PpVv
Ppvv
ppVv
ppvv
41,5%
8,5%
8,5%
41,5%

Figura 2.16 Representação esquemática de um cruzamento em drosófilas que mostra a segregação não independente dos genes para cor do corpo e forma das asas. O cruzamento-teste de fêmeas duplo-heterozigóticas (com machos duplo-recessivos) mostra que elas formam quatro tipos de gameta, mas em proporções diferentes daquelas esperadas pela lei da segregação independente. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Por que os quatro tipos de gameta da fêmea não foram produzidos em mesma proporção, 25% de cada tipo, como seria esperado pela segunda lei de Mendel? Com certeza não está havendo segregação independente entre os genes *P* e *V*. Gametas portadores dos alelos *PV* e dos alelos *pv* ocorrem em porcentagens bem maiores que os gametas portadores dos alelos *Pv* e *pV*. Por que isso acontece?

Morgan explicou os resultados admitindo que os genes para cor do corpo e forma da asa localizam-se no mesmo par de cromossomos homólogos da drosófila. Por isso, eles não se segregavam independentemente.

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Entretanto, a questão que intrigava os geneticistas era: se os genes estavam fisicamente unidos na estrutura do cromossomo, por que sua ligação não era completa? Por que eles não permaneciam totalmente juntos durante a meiose? Como explicar certa porcentagem de “mistura” entre alelos de genes fisicamente ligados no mesmo filamento cromossômico?

Explicando a recombinação pela permutação

Para entender essa questão, vamos relembrar o cruzamento descrito na figura 2.16, em que fêmeas de drosófila duplo-heterozigóticas quanto aos alelos para cor do corpo e forma da asa foram cruzadas com machos duplo-recessivos. Note que um dos cromossomos da fêmea duplo-heterozigótica apresenta os alelos *P* e *V*, recebidos da mãe, enquanto seu homólogo apresenta os alelos *p* e *v*, recebidos do pai.

Como os cromossomos homólogos separam-se na meiose, era de esperar que as fêmeas formassem apenas dois tipos de gameta: 50% com o cromossomo materno, portador dos alelos dominantes (*P* e *V*), e 50% com o cromossomo paterno, portador dos alelos recessivos (*p* e *v*). Entretanto, os resultados mostram que, além desses dois tipos de gameta, as fêmeas duplo-heterozigóticas formam também gametas “recombinantes”, isto é, que combinam genes de origem materna e de origem paterna: 8,5% deles têm os alelos *P* e *v*, e 8,5% têm os alelos *p* e *V*.

Morgan propôs a hipótese de que a ligação entre genes localizados no mesmo cromossomo só não é completa porque, durante a prófase I da meiose, podem ocorrer quebras e trocas de pedaços entre cromátides de cromossomos homólogos. Esse fenômeno, conhecido como **permutação cromossômica** (em inglês, *crossing-over*), leva à formação de certo número de gametas recombinantes, com combinações gênicas diferentes das presentes nos cromossomos herdados dos pais. (Fig. 2.17)

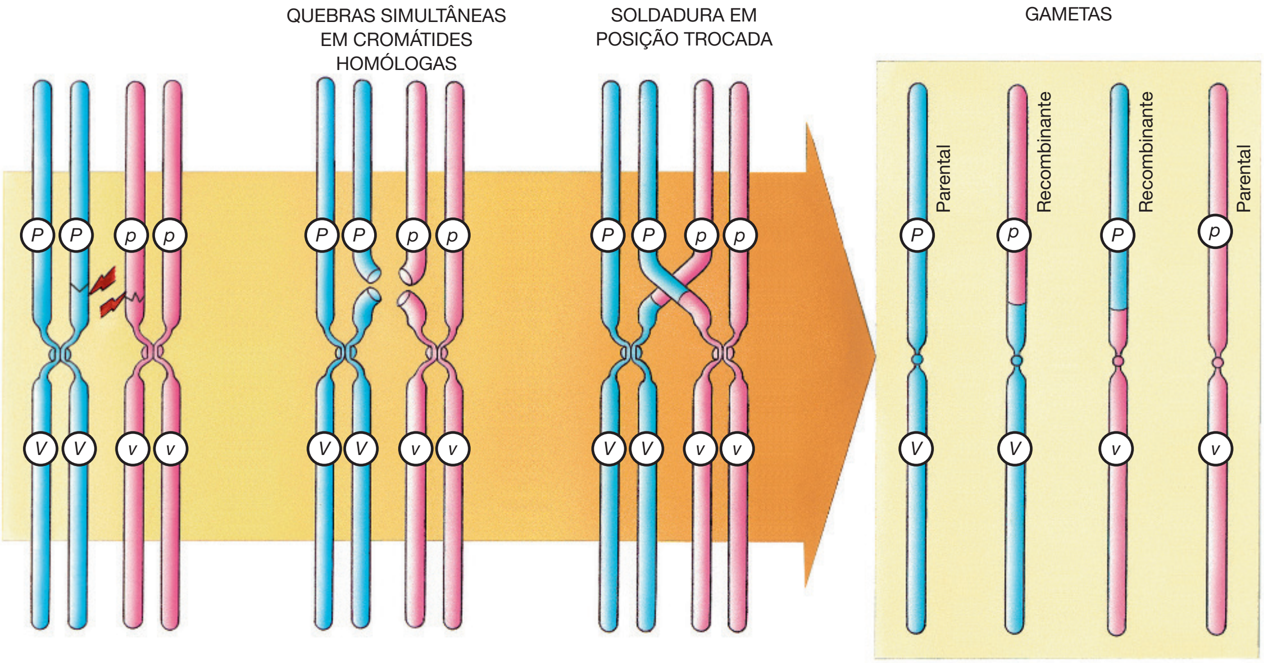

QUEBRAS SIMULTÂNEAS EM CROMÁTIDES HOMÓLOGAS
SOLDADURA EM POSIÇÃO TROCADA
GAMETAS
P
P
p
p
V
V
v
v
Parental
Recombinante
Recombinante
Parental

Figura 2.17 Representação esquemática da permutação entre genes ligados, mostrando a formação de dois cromossomos com combinações gênicas parentais e de dois cromossomos recombinantes. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÃO: ADILSON SECCO

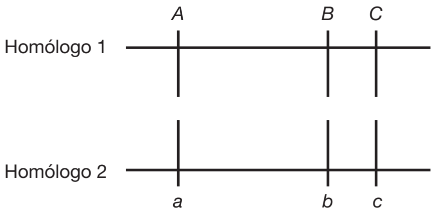
Estimando a taxa de recombinação entre dois locos gênicos

A soma das porcentagens dos descendentes com as características recombinantes no cruzamento-teste corresponde à taxa de permutação entre os dois locos gênicos considerados. No exemplo da drosófila, a taxa de permutação entre o loco do gene para cor do corpo (cinzento-amarelado ou preto) e o loco do gene para forma da asa (alongada ou vestigial) é de 17% (8,5% + 8,5%).

Os pesquisadores do grupo de Morgan se perguntavam: a) Por que a taxa de recombinação entre dois determinados locos gênicos é sempre a mesma? b) Por que a taxa de recombinação varia entre os diferentes locos gênicos?

Eles fizeram o seguinte raciocínio: se a recombinação entre dois genes ligados depende da ocorrência de permutações entre eles, quanto menor for a distância entre dois locos, menor será a chance de haver permutação. Em contrapartida, quanto maior for a distância entre dois locos, maior será a probabilidade de ocorrer permutação entre eles.

Por exemplo, considere três pares de alelos, *Aa*, *Bb* e *Cc,* situados no mesmo cromossomo, dispostos da seguinte maneira nos filamentos cromossômicos:



A conclusão é que a frequência de recombinação entre os genes mais distantes – *A*/*a* e *C*/*c* – é maior que a frequência de recombinação entre os genes mais próximos – *A*/*a* e *B*/*b* ou *B*/*b* e *C*/*c* –, pois qualquer permutação que se verifique entre os genes mais próximos também ocorre entre os genes mais distantes (*A*/*a* e *C*/*c*).

Esse raciocínio parte do pressuposto de que os genes se distribuem linearmente ao longo dos cromossomos, ocupando posições bem definidas. As experiências confirmaram essa hipótese em todas as espécies de seres vivos, incluindo a espécie humana.

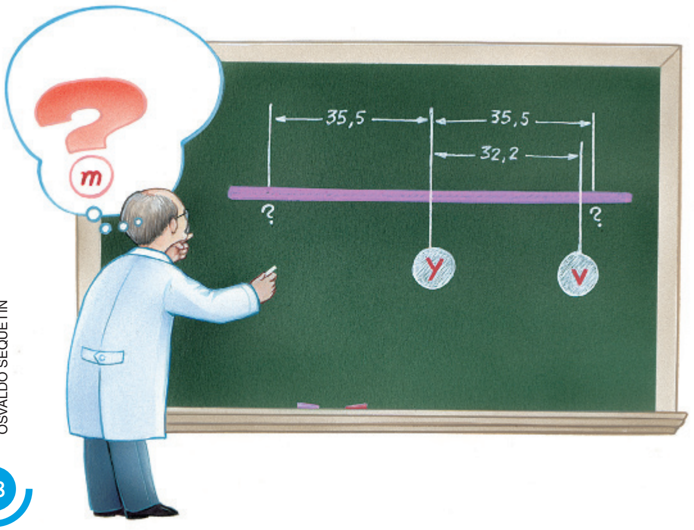
Princípios de construção dos mapas gênicos

Alfred Sturtevant (1891-1970), na época em que estagiava no laboratório de Thomas Hunt Morgan, imaginou a construção de **mapas gênicos**, que mostrariam a distribuição dos genes ao longo do cromossomo e as distâncias relativas entre eles. Ele sugeriu que a distância entre os genes podia ser deduzida pela taxa de recombinação observada nos cruzamentos.

Um dos casos estudados por Sturtevant envolvia três locos gênicos da drosófila: *yellow* (*y*), *vermilion* (*v*) e *miniature* (*m*). Os resultados experimentais obtidos pelo grupo de Morgan indicavam que a taxa de recombinação entre *y* e *v* era de 32,2%, e que a taxa de recombinação entre *y* e *m* era de 35,5%. Portanto, segundo a hipótese da equipe de Morgan, *y* estaria mais próximo de *v* do que de *m*. Entretanto, apenas essas duas informações não permitiam saber em que ordem esses genes estão, isto é, se *v* está entre *y* e *m*, ou se *y* está entre *v* e *m*. (Fig. 2.18)

Seria mais ou menos como determinar as distâncias entre as cidades A e B (300 km) e entre A e C (200 km) localizadas em uma rodovia. Sabemos que a cidade A é mais distante de B do que de C, mas essa informação não nos permite dizer se C se localiza entre A e B, ou se A se localiza entre B e C. Para determinar a sequência dessas cidades, precisamos conhecer a distância entre B e C. Se essa distância for de cerca de 100 km, concluímos que C se localiza entre A e B. A outra possibilidade é que a distância entre B e C seja de cerca de 500 km; nesse caso, A localiza-se entre B e C.

Sturtevant precisava saber a taxa de recombinação entre os locos *v* e *m* para determinar a sequência dos locos *y*, *v* e *m* no cromossomo. Com isso, ele testaria a hipótese de que a taxa de recombinação podia ser usada como medida de distância entre os genes. Segundo sua hipótese, a distância entre os locos *v* e *m* seria de 67,7% (35,5 + 32,2) ou 3,3% (35,5 − 32,2).



OSVALDO SEQUETIN

Figura 2.18 Representação do raciocínio utilizado para determinar as distâncias entre os locos de três genes (*m*, *v* e *y*) a partir de suas taxas de recombinação. Para localizar *m* no mapa, é preciso saber sua taxa de recombinação em relação a *v*.

A partir de cruzamentos-teste entre fêmeas duplo-heterozigóticas *VvMm* e machos duplo-recessivos *vvmm*, Sturtevant verificou que a porcentagem de recombinação entre os locos *v* e *m* era de cerca de 3%. Esse resultado, realmente muito próximo de uma das possibilidades previstas (3,3%), foi uma forte evidência de que as hipóteses usadas na construção do mapa estavam corretas. Além da drosófila, genes de muitas espécies, inclusive da nossa, vêm sendo mapeados dessa maneira.

Unidade de distância nos mapas gênicos

A unidade utilizada para estimar a distância entre genes no cromossomo é denominada **unidade de recombinação** (UR), ou **centimorgan**, ou morganídeo. Estas últimas são uma homenagem às importantes contribuições de Thomas Morgan à Genética. Uma unidade de recombinação, ou centimorgan, corresponde à taxa de 1% de recombinantes. Assim, quando se diz que a distância entre dois locos gênicos é de 17 UR, ou 17 centimorgans, significa que a taxa de recombinantes entre eles é de 17%. Como vimos na figura 2.16, esse é o caso dos locos *black* (loco gênico do mutante para corpo preto) e *vestigial* (loco gênico do mutante para asas vestigiais) em *Drosophila melanogaster*.

Resolvendo problemas de Genética

Ligação gênica e mapeamento cromossômico

O problema

Em *Drosophila melanogaster*, asa selvagem é dominante sobre asa em miniatura; olho selvagem (marrom-avermelhado) é dominante sobre olho vermelho. Fêmeas selvagens puras foram cruzadas com machos de asa miniatura e olhos vermelhos. As fêmeas da geração F_1 foram cruzadas com machos recessivos, produzindo a seguinte descendência:

- 48,5% asa selvagem e olho selvagem;
- 48,5% asa miniatura e olho vermelho;
- 1,5% asa selvagem e olho vermelho;
- 1,5% asa miniatura e olho selvagem.

Pergunta-se:

a) Qual é a evidência de que se trata de ligação gênica?

b) Qual é o arranjo dos genes nas fêmeas duplo-heterozigóticas de F_1: os alelos dominantes estão em um mesmo cromossomo e os alelos recessivos no cromossomo homólogo (arranjo *cis*) ou um dos alelos dominantes está no mesmo cromossomo que contém o alelo recessivo do outro gene e vice-versa (arranjo *trans*)?

c) Qual é a distância relativa entre os locos gênicos considerados?

A solução

Como se trata de um cruzamento-teste (cruzamento com recessivo), o fenótipo da descendência é determinado pelo genótipo dos gametas produzidos pelo indivíduo com características dominantes. Assim, os tipos de óvulo que geraram cada uma das classes de descendentes são:

Fenótipos da descendência	Genótipos dos óvulos	Porcentagem
selvagem/selvagem	*MV*	48,5%
miniatura/vermelho	*mv*	48,5%
selvagem/vermelho	*Mv*	1,5%
miniatura/selvagem	*mV*	1,5%

Percebe-se que não se trata de segregação independente porque os gametas femininos não ocorrem na proporção de 1 : 1 : 1 : 1 (25% de cada tipo). Assim, respondendo ao item **a** do problema: trata-se de um caso de ligação gênica, pois se formaram quatro classes fenotípicas, duas em maior frequência (classes parentais) e duas em menor frequência (classes recombinantes).

Podemos agora responder ao item **b**: o arranjo dos alelos nas fêmeas duplo-heterozigóticas era *cis* (***MV*/*mv***). Isso pôde ser deduzido pelo fato de os gametas ***MV*** e ***mv*** terem sido produzidos em maior frequência, 48,5% cada um.

Para responder ao item **c**, estimamos a distância relativa entre os dois locos gênicos a partir da porcentagem de permutação entre eles. A porcentagem de permutação é igual à soma das porcentagens das classes recombinantes, ou seja, 3% (1,5% + 1,5%). Assim, a distância entre esses dois locos gênicos é de 3 UR ou 3 centimorgans.

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. Cruzamento-teste é aquele em que um indivíduo de genótipo desconhecido é cruzado com 1. d

a) outro indivíduo de genótipo desconhecido.

b) um indivíduo de fenótipo condicionado pelo alelo dominante.

c) um indivíduo portador de um alelo letal.

d) um indivíduo de genótipo recessivo.

2. Uma célula duplo-heterozigótica quanto a dois pares de alelos *Aa* e *Bb* localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos formará por meiose quatro células, sendo 2. d

a) uma portadora de *A*, outra de *a*, outra de *B* e outra de *b*.

b) uma portadora de *AB*, outra de *Ab*, outra de *aB* e outra de *ab*.

c) uma portadora de *AA*, outra de *Ab*, outra de *aB* e outra de *aa*.

d) duas portadoras de *AB* e duas portadoras de *ab*, ou duas portadoras de *Ab* e duas portadoras de *aB*.

3. Um indivíduo multicelular duplo-heterozigótico quanto a dois pares de alelos, *Aa* e *Bb*, localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos, forma gametas na proporção de 3. b

a) 1 *A* : 1 *a* : 1 B : 1 *b*.

b) 1 *AB* : 1 *Ab* : 1 *aB* : 1 *ab*.

c) 1 *AA* : 1 *Ab* : 1 *aB* : 1 *aa*.

d) 1 *AB* : 1 *ab* ou 1 *Ab* : 1 *aB*.

4. No cruzamento entre indivíduos duplo-heterozigóticos quanto a dois pares de alelos, *Aa* e *Bb*, localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos, espera-se obter 4. d

a) apenas indivíduos *AaBb*.

b) indivíduos *AB* e *ab* na proporção de 1 : 1.

c) indivíduos *AA*, *Ab*, *aA* e *bb* na proporção de 9 : 3 : 3 : 1, respectivamente.

d) indivíduos *A_B_*, *A_bb*, *aaB_* e *aabb*, na proporção de 9 : 3 : 3 : 1, respectivamente.

5. Pela análise das porcentagens de gametas que o indivíduo heterozigótico da questão anterior formou, pode-se concluir que 5. c

a) os alelos *A* e *B* estavam no mesmo cromossomo e os alelos *a* e *b*, em seu homólogo (*AB*/*ab*).

b) os alelos *A* e *b* estavam no mesmo cromossomo e os alelos *a* e *B*, em seu homólogo (*Ab*/*aB*).

c) os alelos *A* e *a* estavam em um par de cromossomos e os alelos *B* e *b*, em outro par cromossômico.

d) nenhuma das conclusões anteriores é possível com esses dados.

6. Um indivíduo duplo-heterozigótico *AaBb* formou 4 tipos de gametas nas seguintes porcentagens: 40% *AB* : 40% *ab* : 10% *Ab* : 10% *aB*. Esses números indicam que se trata de um caso de 6. c

a) herança quantitativa.

b) interação gênica.

c) ligação gênica.

d) segregação independente.

7. Ainda com relação aos dados da questão 6, pode-se estimar a distância entre os dois locos gênicos no cromossomo em 7. b

a) 10 UR (unidades de recombinação ou centimorgans).

b) 20 UR (unidades de recombinação ou centimorgans).

c) 40 UR (unidades de recombinação ou centimorgans).

d) 80 UR (unidades de recombinação ou centimorgans).

8. As taxas de recombinação entre três genes – *t*, *r* e *s* –, localizados em um mesmo par de cromossomos homólogos, foram as seguintes: 3% entre *t* e *r*; 8% entre *t* e *s*; 11% entre *r* e *s*. Conclui-se que a ordem desses genes no cromossomo é 8. c

a) *t*-*r*-*s*.

b) *t*-*s*-*r*.

c) *r*-*t*-*s*.

d) impossível de ser determinada com base nessas informações.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

9. As flores do goiveiro podem ser brancas, vermelhas ou cor de creme. A cor branca é condicionada por um alelo recessivo *a*, que em homozigose evita a produção de qualquer pigmento na planta; o alelo dominante *A* condiciona a produção de pigmento, que pode ser vermelho ou creme, dependendo de outro par de alelos (*Cc*). O alelo dominante *C* condiciona pigmento vermelho, enquanto o alelo recessivo *c* determina pigmento cor de creme. Os dois genes estão localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos. Com base nessas informações, responda:

a) Que proporções fenotípicas e genotípicas são esperadas do cruzamento de plantas de flores vermelhas duplo-heterozigóticas com plantas de flores creme de genótipo *Aacc*?

b) No cruzamento de plantas de flores cor de creme com plantas de flores vermelhas foram produzidas apenas plantas de flores vermelhas e plantas de flores brancas; determine os prováveis genótipos dos genitores.

Caso haja tempo e interesse, pode ser interessante estimular os alunos a criar uma animação do tipo *stop motion* para compreender melhor a segregação independente dos genes. Pesquise essa técnica cinematográfica previamente com os estudantes e deixe-os livres depois de realizarem a atividade para criarem sua sequência de fotografias. Garanta que todas as animações produzidas sejam vistas por todos os estudantes. É possível enriquecer essa prática com uma atividade complementar presente no **Suplemento para o professor**, na qual os alunos podem simular a permutação utilizando os mesmos materiais desta atividade.

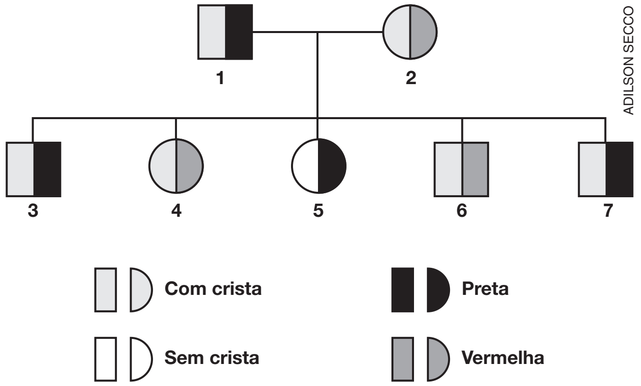
10. A característica "caule longo" em ervilha é condicionada pelo alelo *B*, dominante em relação ao alelo *b*, que condiciona caule curto. A cor verde da vagem é condicionada pelo alelo *A*, dominante em relação ao alelo *a*, que condiciona vagem de cor amarela. O cruzamento de uma planta homozigótica de caule longo e vagem amarela com uma planta homozigótica de caule curto e vagem verde resultou em uma geração F_1 cujos indivíduos, ao serem cruzados com plantas de caule curto e vagem amarela, produziram uma descendência de 120 plantas de caule longo e vagem verde, 110 plantas de caule longo e vagem amarela, 119 plantas de caule curto e vagem verde e 111 plantas de caule curto e vagem amarela.

a) Faça um diagrama dos cruzamentos, indicando os genótipos dos indivíduos.

b) Em sua opinião, os dois genes apresentam segregação independente? Por quê?

c) Quais os tipos de gameta que serão produzidos pelas plantas descendentes do último cruzamento?

11. Analise a árvore genealógica e resolva os itens do problema.



ADILSON SECCO

Em galináceos, a presença de crista é condicionada pelo alelo dominante *C*, e sua ausência, pelo genótipo recessivo *cc*. A cor das penas pode ser preta, condicionada pelo alelo dominante *V*, ou vermelha, condicionada pelo genótipo recessivo *vv*. Na árvore genealógica, a metade esquerda dos quadrados e círculos se refere à presença ou ausência de crista, enquanto o lado direito se refere à coloração das penas. Os locos desses genes localizam-se em diferentes pares de cromossomos homólogos.

a) Determine os genótipos de todos os indivíduos do heredograma.

b) Se cruzássemos o indivíduo 1 com o indivíduo 5, que proporção fenotípica poderíamos esperar na descendência?

Faça você mesmo! Registre em seu caderno

12. **Atividade prática: Simulando a segregação independente dos genes**

Nesta atividade utilizaremos materiais e princípios simples para simular a segregação dos alelos de dois genes localizados em pares diferentes de cromossomos homólogos.

Material

- massa de modelar (ou barbantes grossos) de duas cores diferentes;
- dois pequenos quadrados de papel com aproximadamente 1 cm de lado;
- folhas grandes de papel de embrulho.

Procedimento

1. Modele um par de cromossomos homólogos metacêntricos de cores diferentes (por exemplo, vermelha e laranja) e um par de cromossomos homólogos acrocêntricos, também de cores diferentes (por exemplo, um azul e outro verde).
2. No par de cromossomos metacêntricos, aplique os quadrados de papel com as letras ***A*** e ***a***. Nos cromossomos acrocêntricos, aplique quadrados com as letras ***B*** e ***b***, para representar os alelos do outro gene.
3. O primeiro passo da atividade é simular a duplicação cromossômica para, em seguida, distribuir os cromossomos homólogos duplicados e emparelhados sobre a folha de papel, simulando a metáfase I da meiose.
4. Analise como você orientou os cromossomos para os polos da célula: vermelho e azul para um dos polos e laranja e verde para o outro? Existe outra possibilidade de orientação? Por quê?
5. Simule a separação dos cromossomos homólogos na primeira divisão da meiose. Em seguida, simule a segunda divisão, na qual ocorre separação das cromátides de cada cromossomo. Quantas células foram obtidas e qual a constituição cromossômica de cada uma delas? Quantos tipos de células quanto à constituição gênica (tipos de alelos) foram obtidos?
6. Refaça a simulação empregando uma orientação diferente dos cromossomos na metáfase I e verifique os tipos de células formados ao final do processo meiótico.

Elabore um pequeno texto resumindo suas conclusões sobre a formação de gametas em um indivíduo com o genótipo utilizado nesta atividade.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (Ufal) Em determinada raça animal, a cor preta é determinada pelo alelo dominante *M* e a marrom pelo alelo *m*, o alelo *B* condiciona padrão uniforme, e o *b*, presença de manchas brancas. Esses dois pares de alelos autossômicos segregam-se independentemente. A partir do cruzamento *Mmbb* · *mmBb*, a probabilidade de nascer um filhote marrom com manchas é 1. c

a) $\frac{1}{16}$ **b)** $\frac{3}{16}$ **c)** $\frac{1}{4}$ **d)** $\frac{1}{2}$ **e)** $\frac{3}{4}$

2. (UFSCar-SP) Suponha um organismo diploide, $2n = 4$, e a existência de um gene *A* em um dos pares de cromossomos homólogos e de um gene *B* no outro par de homólogos. Um indivíduo heterozigótico para os dois genes formará 2. d

a) 2 tipos de gametas na proporção 1 : 1.
b) 2 tipos de gametas na proporção 3 : 1.
c) 4 tipos de gametas na proporção 9 : 3 : 3 : 1.
d) 4 tipos de gametas na proporção 1 : 1 : 1 : 1.
e) 4 tipos de gametas na proporção 1 : 2 : 1.

3. (Unifal-MG) Basicamente, quanto mais distante um gene está do outro no mesmo cromossomo, maior é a probabilidade de ocorrência de permutação (*crossing-over*) entre eles. Se os genes Z, X e Y apresentam as frequências de permutação XZ (0,34), YZ (0,13) e XY (0,21), a ordem-mapa desses genes no cromossomo é 3. c

a) XZY. **b)** ZXY. **c)** ZYX. **d)** YZX. **e)** YXZ.

4. (UFRGS-RS) Com relação ao processo conhecido como *crossing-over*, podemos afirmar que ele

a) diminui a variabilidade genética. 4. d
b) separa cromátides homólogas.
c) corrige a recombinação gênica.
d) aumenta a variabilidade genética.
e) troca cromossomos entre genes homólogos.

5. (UFPA) Um casal, cujo homem tem sangue tipo A Rh^+ e a mulher O Rh^-, teve o primeiro filho com tipo sanguíneo O Rh^-. A probabilidade de um segundo filho ter o mesmo genótipo do primeiro é de 5. b

a) 0%. **c)** 50%. **e)** 100%.
b) 25%. **d)** 75%.

Questões discursivas

6. (Fuvest-SP) Em cobaias, a cor preta é condicionada pelo alelo dominante *D* e a cor marrom, pelo alelo recessivo *d*. Em um outro cromossomo, localiza-se o gene responsável pelo padrão da coloração: o alelo dominante *M* determina padrão uniforme (uma única cor) e o alelo recessivo *m*, padrão malhado (preto/branco ou marrom/branco).

O cruzamento de um macho de cor preta uniforme com uma fêmea de cor marrom uniforme produz uma ninhada de oito filhotes: 3 de cor preta uniforme, 3 de cor marrom uniforme, 1 preto e branco e 1 marrom e branco.

a) Quais os genótipos dos pais?
b) Se o filho preto e branco for cruzado com uma fêmea cujo genótipo é igual ao da mãe dele, qual a proporção esperada de descendentes iguais a ele?

7. (Unicamp-SP) Considere duas linhagens homozigotas de plantas, uma com caule longo e frutos ovais e outra com caule curto e frutos redondos. Os genes para comprimento do caule e forma do fruto segregam-se independentemente. O alelo que determina caule longo é dominante, assim como o alelo para fruto redondo.

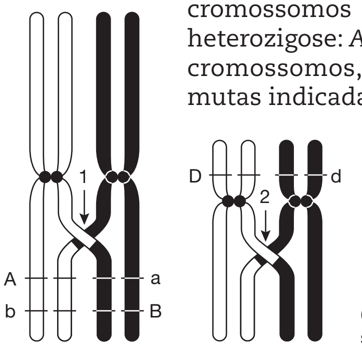
a) De que forma podem ser obtidas plantas com caule curto e frutos ovais a partir das linhagens originais? Explique indicando o(s) cruzamento(s). Utilize as letras *A*, *a* para comprimento do caule e *B*, *b* para forma dos frutos.
b) Em que proporção essas plantas de caule curto e frutos ovais serão obtidas?

8. (UFRJ) Considere a existência de dois locos em um indivíduo. Cada loco tem dois alelos *A* e *a* e *B* e *b*, sendo que *A* e *B* são dominantes. Um pesquisador cruzou um indivíduo *AaBb* com um indivíduo *aabb*. A prole resultante foi:

- 40% *AaBb*;
- 40% *aabb*;
- 10% *Aabb*;
- 10% *aaBb*.

O pesquisador ficou surpreso, pois esperava obter os quatro genótipos na mesma proporção, 25% para cada um deles. Esses resultados contrariam a segunda lei de Mendel ou lei da segregação independente? Justifique sua resposta.

9. (Fuvest-SP) O esquema a seguir representa, numa célula em divisão meiótica, dois pares de cromossomos com três genes em heterozigose: *A*/*a*, *B*/*b* e *D*/*d*. Nesses cromossomos, ocorreram as permutas indicadas pelas setas 1 e 2.



(Esquema simplificado.)

ADILSON SECCO

a) Quanto aos pares de alelos mencionados, que tipos de gameta essa célula poderá formar?
b) Que pares de alelos têm segregação independente?

Capítulo 3 Herança e sexo

KEN BRATE/SCIENCE SOURCE/FOTOARENA

A coloração, o odor e o néctar das flores são estratégias que atraem organismos como as abelhas. Em sucessivas visitas, esses insetos transportam pólen de flor em flor, promovendo a reprodução das plantas. Na foto, abelha *Apis mellifera* sobre inflorescência da espécie *Symphyotrichum oolentangiense*. Essa abelha mede cerca de 12 mm de comprimento.

De novo o sexo...

Que o sexo é cheio de mistérios é inquestionável! E olhe que não estamos nos referindo aos meandros do relacionamento humano, e sim à própria origem e evolução da reprodução sexuada nos seres vivos.

Uma possível vantagem evolutiva do sexo é o aumento da diversidade genética, proporcionado pela união e mistura de genótipos de indivíduos diferentes. Para a maioria dos biólogos, o fato de a reprodução sexuada ter se perpetuado e se tornado tão "hegemônica" na natureza mostra que ela apresenta vantagens sobre a reprodução assexuada. Só que ainda não se sabe exatamente quais são essas vantagens e como o sexo se "universalizou" entre os seres vivos eucarióticos.

Na maioria das espécies de animais, há indivíduos que produzem gametas femininos – as fêmeas – e indivíduos que produzem gametas masculinos – os machos. Poeticamente, os antigos biólogos chamaram essas espécies de dioicas (do grego *di*, dois, e *oikos*, casa), uma vez que há duas "casas", a feminina e a masculina, uma para cada sexo. Muitas espécies possuem apenas uma "casa", onde moram os dois sexos, sendo por isso denominadas monoicas (do grego *mono*, um). Nelas o mesmo indivíduo produz gametas femininos e masculinos. É possível que você já conheça o termo hermafrodita, utilizado como sinônimo de monoico. Etimologicamente, hermafrodita é o indivíduo que reúne as essências de Hermes, deus grego que representa a masculinidade, e de Afrodite, deusa grega que representa os dotes femininos. Como você pode perceber, os conceitos biológicos estão repletos de significados ocultos!

O que faz um organismo ser fêmea ou ser macho, isto é, produzir gametas femininos ou gametas masculinos? Em última análise, o funcionamento de seus genes. Nas espécies dioicas, o sexo depende da ação de genes específicos, que atuam no desenvolvimento e fazem um indivíduo tornar-se macho ou fêmea.

Curiosamente, em certas espécies, os genes que determinam o sexo são fortemente afetados pelo ambiente. Por exemplo, o sexo de crocodilos, de jacarés, de várias espécies de tartaruga e de algumas espécies de lagarto é determinado pela temperatura em que os ovos são incubados. Em crocodilos, embriões que se desenvolvem em temperaturas relativamente baixas são sempre do sexo feminino; se a incubação ocorre acima de 31 °C, desenvolvem-se machos.

Podem-se propor aos estudantes atividades de pesquisa sobre exemplos em que os genes determinantes do sexo são influenciados pela temperatura ambiental. Aproveite para relacionar esses exemplos com o aquecimento global e analisar os potenciais riscos de extinção das espécies pesquisadas.

Em diversas espécies, incluindo a nossa, o sexo é definido no momento exato da fecundação, pela combinação cromossômica dos gametas.

A importância do assunto

Neste capítulo, o estudo da Genética ganha um novo componente: o sexo. Como veremos a seguir, recebemos de nossos pais uma combinação específica de cromossomos e genes responsável pela determinação do sexo.

A relação entre genes e cromossomos fica mais clara quando estudamos características ligadas ao sexo. Ao refletir sobre Genética, procure ter sempre em mente as células com seus cromossomos. Não se esqueça de que os genes estão nos cromossomos e estes, na meiose, distribuem-se para os gametas, que originarão a geração seguinte.

Para compreender o comportamento dos genes responsáveis por distúrbios hereditários como o daltonismo e a hemofilia, focalize sua atenção nos cromossomos sexuais humanos. Ao estudar este capítulo você acrescentará mais um "tijolo" na construção de sua compreensão da Genética. Exercite-se sempre e não deixe de "demolir" qualquer dúvida que surja.

Os diferentes sistemas de determinação do sexo podem ser mais bem compreendidos se os estudantes elaborarem modelos (em massa, argila ou papel) que concretizem a distribuição dos cromossomos sexuais para os gametas em cada sistema estudado. Dependendo da disponibilidade de tempo, isso pode ser feito fora do período de aula, em grupos, com exposição dos trabalhos pelos estudantes e fechamento dos assuntos em sala de aula.

3.1 Os cromossomos e o sexo

Em muitas espécies de animais e em algumas plantas, a diferença entre machos e fêmeas é definida por um par de cromossomos especiais, os **cromossomos sexuais**. Os outros pares de cromossomos, equivalentes em machos e fêmeas, recebem o nome de **autossomos** (do grego *autos*, próprio). Vejamos, a seguir, algumas das variações do sistema cromossômico de determinação do sexo.

Principais sistemas cromossômicos de determinação do sexo

Sistema XY

Em muitas espécies dioicas, as fêmeas têm um par homólogo de cromossomos sexuais, enquanto os machos têm um cromossomo sexual semelhante ao da fêmea e outro tipicamente masculino, sem correspondente no sexo feminino. O cromossomo sexual presente tanto em fêmeas quanto em machos é denominado **cromossomo X**, e o cromossomo sexual exclusivo de machos é o **cromossomo Y**. (Fig. 3.1)

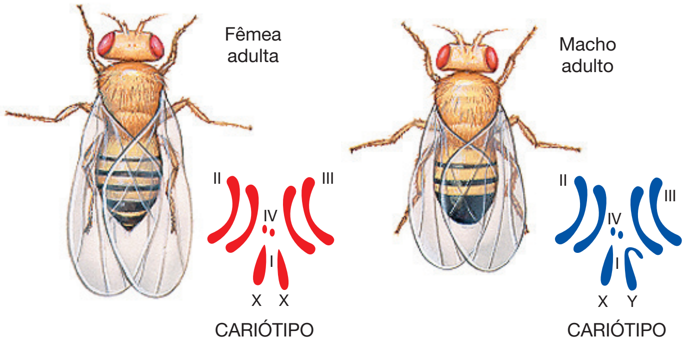


Figura 3.1 Representação esquemática de fêmea e macho adultos de *Drosophila melanogaster* e representação esquemática dos conjuntos cromossômicos (cariótipos) de cada um dos sexos. Nessa espécie, machos e fêmeas têm três pares de autossomos (II, III e IV) e um par de cromossomos sexuais (par I), XX na fêmea e XY no macho. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Esse tipo de determinação cromossômica do sexo, conhecido como **sistema XY**, ocorre em diversos grupos de insetos, nos mamíferos, incluindo a espécie humana, em diversos peixes e em algumas plantas, entre outros organismos. Em resumo, o sistema XY caracteriza-se pelo fato de as fêmeas possuírem dois cromossomos X e os machos, um cromossomo X e um Y.

Sistema X0 e sistema ZW

Em alguns insetos, como na maioria das espécies de gafanhotos, as fêmeas têm um par de cromossomos sexuais, enquanto os machos possuem apenas um cromossomo sexual. Consequentemente, no cariótipo dos machos há sempre um número ímpar de cromossomos, um a menos que as fêmeas. Nessas espécies, o cromossomo sexual é denominado X, e o sistema de determinação do sexo é conhecido como **sistema X0** (lê-se "xis-zero"), sendo o zero indicativo da ausência de um cromossomo sexual nos machos.

Aves, diversas espécies de répteis, algumas espécies de peixes e algumas espécies de insetos (borboletas e mariposas, por exemplo) apresentam um sistema de determinação do sexo em que são as fêmeas que possuem dois cromossomos sexuais diferentes, ao contrário do que ocorre no sistema XY. Os machos têm um par homólogo de **cromossomos Z**, enquanto as fêmeas têm um cromossomo Z e um **cromossomo W**, exclusivo do sexo feminino. Esse sistema de determinação do sexo é conhecido por **sistema ZW**.

Algumas espécies de mariposas e de peixes, por exemplo, não apresentam o cromossomo W. Os machos têm sempre um par de cromossomos sexuais ZZ, e as fêmeas, apenas um cromossomo sexual Z. Esse sistema é conhecido como **sistema Z0** (lê-se "zê-zero"), sendo o zero um indicativo da ausência do cromossomo W nas fêmeas.

Cromossomos sexuais e determinação do sexo

Nas espécies com sistemas XY e X0 de determinação do sexo, a meiose de uma célula feminina XX dá origem a um único tipo de gameta, portador de um lote de autossomos e de um cromossomo sexual X. A meiose masculina, por sua vez, origina sempre dois tipos de espermatozoide quanto ao par de cromossomos sexuais. No sistema XY, 50% dos espermatozoides têm um cromossomo X e 50% têm um cromossomo Y; no sistema X0, 50% dos espermatozoides têm um cromossomo X e 50% não têm cromossomo sexual.

Como nos sistemas XY e X0 as fêmeas formam sempre um único tipo de gameta quanto ao cromossomo sexual, elas são o **sexo homogamético** (do grego *homos*, igual). Os machos constituem o **sexo heterogamético** (do grego *heteros*, diferente), pois formam dois tipos de gameta quanto aos cromossomos sexuais.

Note que é o sexo heterogamético que determina o sexo da prole. No sistema XY, um espermatozoide portador do cromossomo X, ao fecundar um óvulo (sempre portador do cromossomo X), leva à formação de um zigoto XX, que se desenvolve em fêmea. E um gameta masculino portador do cromossomo Y, ao fecundar o óvulo, leva à formação de um zigoto XY, que se desenvolve em macho.

No sistema X0, 50% dos espermatozoides são portadores de um cromossomo X, que origina fêmeas, e outros 50% não têm nenhum cromossomo sexual ("0"), levando à formação de zigotos X0, que se desenvolvem em machos.

Nos sistemas ZW e Z0, o sexo heterogamético é o feminino e são as fêmeas, portanto, que determinam o sexo da prole. Um óvulo portador do cromossomo Z, ao ser fecundado por um espermatozoide (sempre portador de um cromossomo Z), origina um zigoto ZZ, que se desenvolve em macho. Um óvulo portador do cromossomo W, ao ser fecundado por um espermatozoide (Z), origina um zigoto ZW, que se desenvolve em fêmea.

Em insetos himenópteros, como abelhas e formigas, machos são haploides (*n*) e fêmeas são diploides (2*n*). Esse sistema de determinação do sexo é conhecido como **sistema haploide/diploide**.

Nas abelhas melíferas, por exemplo, os machos, denominados zangões, são haploides (*n*), pois originam-se de óvulos não fecundados que se desenvolvem por partenogênese (desenvolvimento sem fecundação). Os óvulos fecundados, diploides (2*n*), originam fêmeas, as quais podem se desenvolver em rainhas (férteis) ou em operárias (estéreis), dependendo do tipo de alimentação que receberem durante a fase larval. (Fig. 3.2)

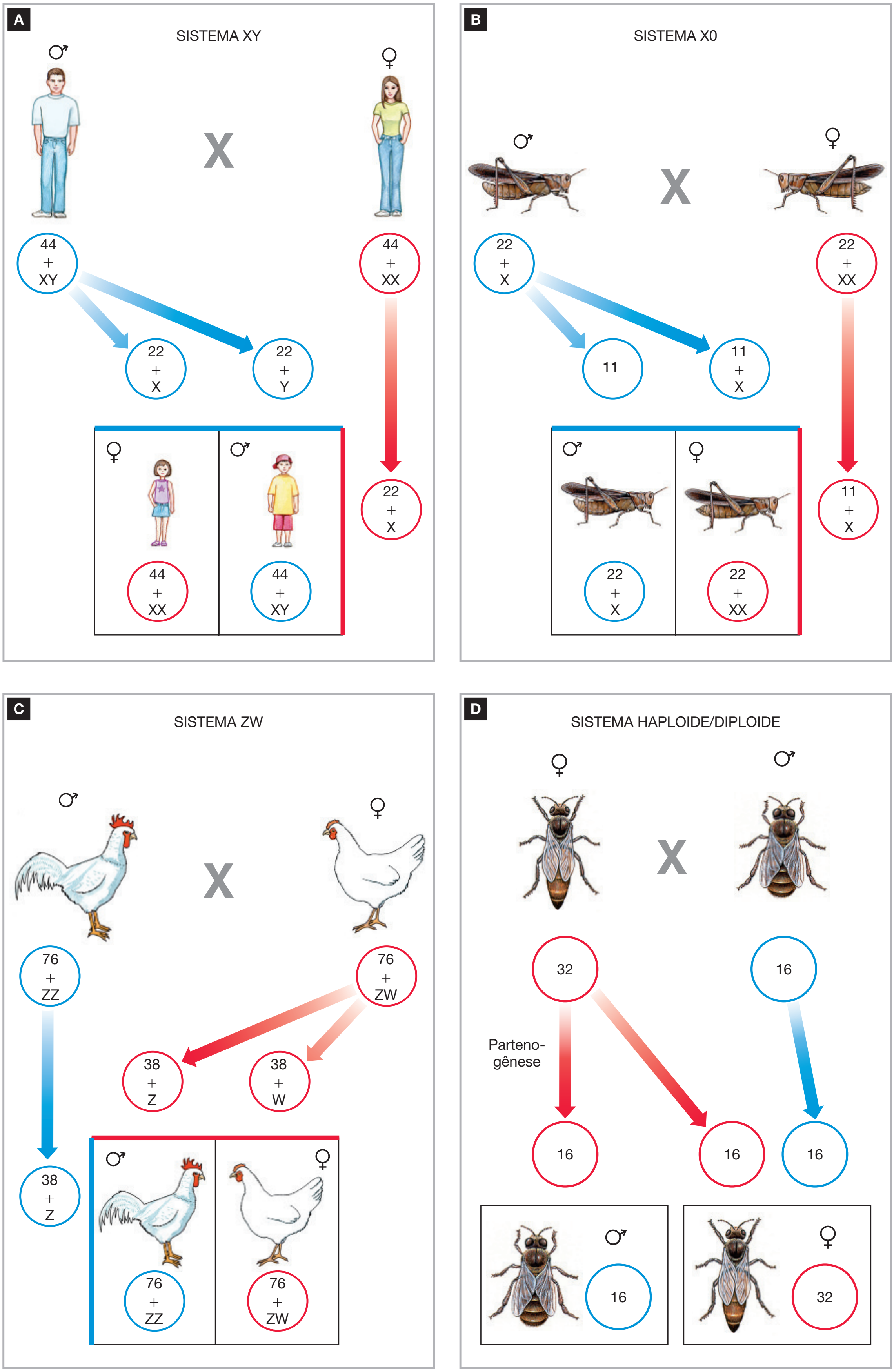

A
SISTEMA XY
♂
X
♀
44 + XY
44 + XX
22 + X
22 + Y
22 + X
♀
44 + XX
♂
44 + XY
B
SISTEMA X0
♂
X
♀
22 + X
22 + XX
11
11 + X
11 + X
♂
22 + X
♀
22 + XX
C
SISTEMA ZW
♂
X
♀
76 + ZZ
76 + ZW
38 + Z
38 + W
38 + Z
♂
76 + ZZ
♀
76 + ZW
D
SISTEMA HAPLOIDE/DIPLOIDE
♀
X
♂
32
16
Partenogênese
16
16
16
♂
16
♀
32

Figura 3.2 Representações esquemáticas de diferentes sistemas de determinação do sexo.
A. XY (espécie humana). **B.** X0 (gafanhoto). **C.** ZW (galinha). **D.** Sistema haploide/diploide (abelha).

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

3.2 Herança de genes localizados em cromossomos sexuais

Os cromossomos sexuais X e Y praticamente não apresentam homologia. Enquanto o cromossomo X possui grande quantidade de genes, envolvidos na determinação de diversas características, o cromossomo Y tem poucos genes. Por isso, indivíduos sem cromossomos X não sobrevivem, ao passo que a ausência de cromossomo Y é compatível com a vida.

Vamos raciocinar sobre o comportamento de um gene localizado no cromossomo X. Suponhamos um gene hipotético com dois alelos, *A* e *a*, localizados no cromossomo X. Fêmeas podem apresentar três tipos de genótipo quanto a esse gene: X^AX^A, X^AX^a e X^aX^a.

Como os machos têm apenas um cromossomo X, eles portam um único alelo do gene: seus genótipos podem ser X^AY ou X^aY. Por ter apenas um alelo dos genes localizados no cromossomo X, metade do que possuem as fêmeas, machos são denominados **hemizigotos** (do grego *hemi*, metade). Diz-se também que os genes localizados no cromossomo sexual X nos machos estão em **hemizigose** (ou em dose simples).

Genes localizados no cromossomo X (ou Z), que não possuem alelo correspondente no cromossomo Y (ou W), têm a chamada **herança ligada ao cromossomo sexual**. Genes localizados nos autossomos, por sua vez, seguem o que se denomina **herança autossômica**.

Na herança ligada ao cromossomo X, descendentes do sexo masculino herdam os genes presentes no cromossomo X apenas da mãe; filhas herdam metade desses genes da mãe e metade do pai. Por sua vez, o pai transmite genes localizados no cromossomo X apenas às filhas. Vejamos, a seguir, alguns exemplos de herança ligada ao cromossomo X na espécie humana.

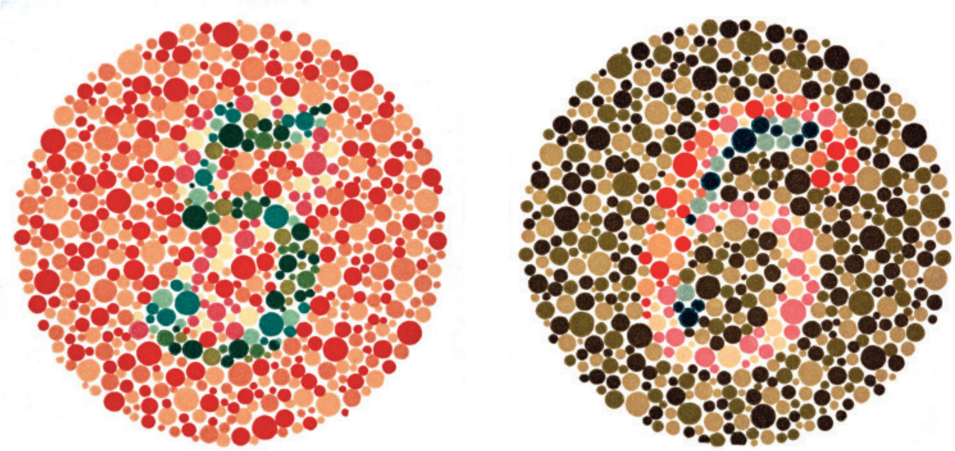
Exemplos de herança ligada ao cromossomo X

Aproveite o tema para enfatizar as aplicações práticas que os conhecimentos teóricos podem ter. Mostre que o estudo da herança de doenças humanas como a hemofilia e o daltonismo permite estimar as chances de um casal vir a ter filhos afetados.

Daltonismo ou cegueira para cores

Cerca de 5% a 8% dos homens e 0,04% das mulheres apresentam um tipo de cegueira para cores conhecida como **daltonismo**; essas pessoas são incapazes de distinguir entre as cores vermelha e verde. O termo daltonismo originou-se do nome do físico e químico inglês John Dalton (1766-1844), que era portador dessa característica. (Fig. 3.3)

O daltonismo é condicionado por um alelo de um gene localizado no cromossomo X. Um homem hemizigótico recessivo para esse alelo (X^dY) ou uma mulher homozigótica recessiva (X^dX^d) são daltônicos, ou seja, incapazes de distinguir o verde do vermelho. Mulheres heterozigóticas (X^DX^d) geralmente têm visão normal, pois o alelo para o daltonismo é recessivo. Mulheres filhas de pai não daltônico sempre terão visão normal, pois recebem um alelo normal do pai.



FOTOS: PRISMA BILDAGENTUR AG/ALAMY/GLOW IMAGES

Figura 3.3 Teste de cores de Ishihara, diagramas empregados para identificar o tipo mais comum de cegueira para cores (daltonismo). Pessoas de visão normal conseguem distinguir um número escrito dentro dos círculos, o que não ocorre com as daltônicas.

Se uma mulher transmitir o cromossomo X com o alelo mutante (X^d) para um filho, ele certamente será daltônico, uma vez que recebeu do pai um cromossomo Y. Assim, cerca de 50% dos filhos homens de uma mulher heterozigótica quanto ao daltonismo herdarão o cromossomo portador do alelo alterado e serão daltônicos. Homens daltônicos só transmitem para as filhas seu cromossomo X portador do alelo alterado. (Fig. 3.4)

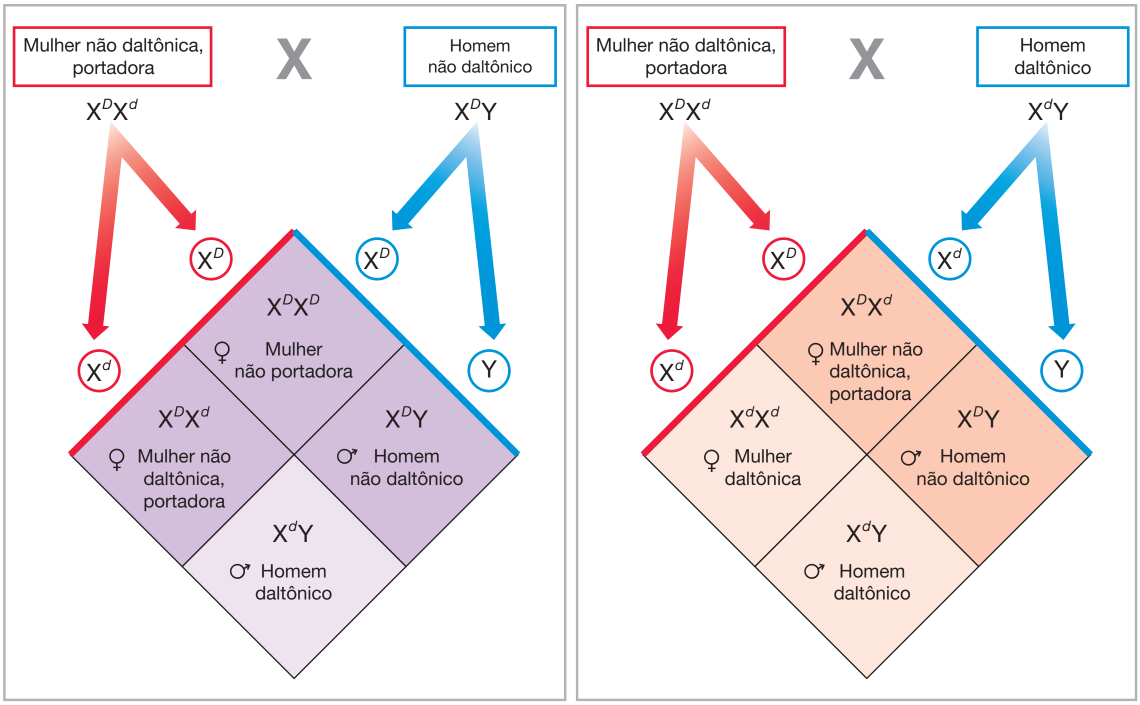

Mulher não daltônica, portadora
X
Homem não daltônico
X^DX^d
X^DY
X^D
X^D
X^d
Y
X^DX^D
♀ Mulher não portadora
X^DX^d
♀ Mulher não daltônica, portadora
X^DY
♂ Homem não daltônico
X^dY
♂ Homem daltônico
Mulher não daltônica, portadora
X
Homem daltônico
X^DX^d
X^dY
X^D
X^d
X^d
Y
X^DX^d
♀ Mulher não daltônica, portadora
X^dX^d
♀ Mulher daltônica
X^DY
♂ Homem não daltônico
X^dY
♂ Homem daltônico

Figura 3.4 Representação esquemática da herança do daltonismo em duas situações: à esquerda, homem não daltônico com mulher portadora do alelo mutante; à direita, homem daltônico com mulher portadora do alelo mutante.

Hemofilia

A **hemofilia** é uma doença hereditária causada por uma falha no sistema de coagulação do sangue; a pessoa hemofílica pode ter hemorragias abundantes, mesmo em pequenos ferimentos ou contusões.

Um dos tipos mais graves de hemofilia, a hemofilia A, é causada pela deficiência do chamado fator VIII de coagulação. O gene responsável por essa característica localiza-se no cromossomo sexual X e apresenta um alelo normal (X^H), que leva à produção de fator VIII funcional, e formas alteradas (alelos X^h), que não levam à produção de fator VIII funcional. Basta a presença de um alelo normal no genótipo para a pessoa apresentar coagulação normal do sangue (não hemofílica).

Pessoas hemofílicas podem ser tratadas com injeções de fator VIII, extraído do sangue de pessoas que não apresentam a hemofilia.

A transmissão hereditária dessa doença segue o padrão típico de herança ligada ao cromossomo X. Mulheres de genótipo X^hX^h e homens de genótipo X^hY são hemofílicos; homens X^HY, mulheres X^HX^H e mulheres X^HX^h não apresentam a doença. (Fig. 3.5)

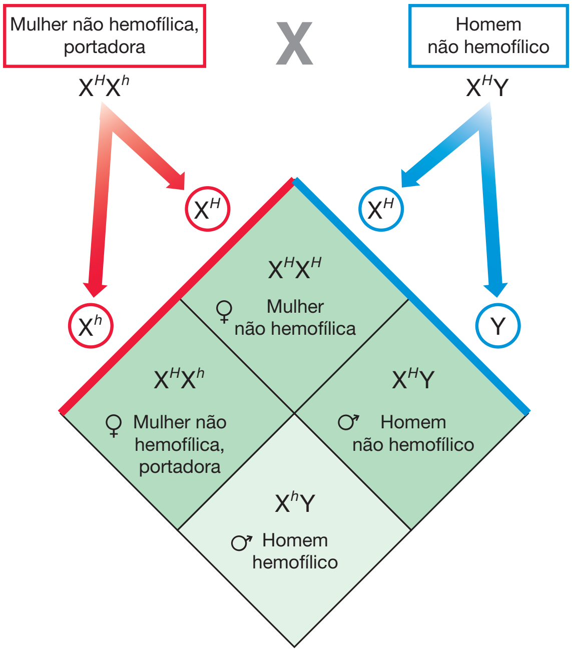

Mulher não hemofílica, portadora
X
Homem não hemofílico
X^HX^h
X^HY
X^H
X^H
X^h
Y
X^HX^H
♀ Mulher não hemofílica
X^HX^h
♀ Mulher não hemofílica, portadora
X^HY
♂ Homem não hemofílico
X^hY
♂ Homem hemofílico

Figura 3.5 Representação esquemática da herança da hemofilia nos descendentes de um homem não hemofílico e uma mulher portadora do alelo condicionante da doença.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Resolvendo problemas de Genética

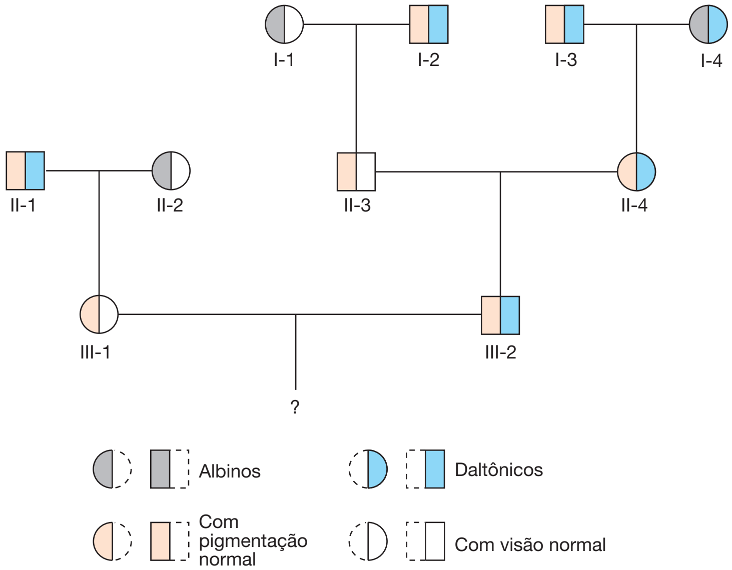
Herança autossômica e herança ligada ao cromossomo X

Genes com herança autossômica segregam-se independentemente de genes com herança ligada ao cromossomo X, pois encontram-se em cromossomos diferentes. Para exercitar essa compreensão, o problema a seguir considera, simultaneamente, um traço com herança autossômica e outro com herança ligada ao cromossomo X.

O problema

O albinismo tipo I na espécie humana tem herança autossômica, sendo condicionado por um alelo recessivo. O daltonismo tem herança ligada ao cromossomo X.

No heredograma a seguir, os indivíduos de uma família estão representados divididos ao meio; a metade da esquerda indica o fenótipo para a pigmentação da pele (pigmentação normal ou albino), e a da direita, o fenótipo para a visão em cores (visão normal ou daltônico).



ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Analise a genealogia e responda:

a) Qual é a probabilidade de uma criança filha do casal III-1 × III-2 ter albinismo e não ser daltônica?

b) Sabendo que o casal III-1 × III-2 já tem um filho do sexo masculino albino que não é daltônico, qual é a probabilidade de um próximo filho do sexo masculino do casal ser albino e daltônico?

A solução

O primeiro passo consiste em determinar os genótipos possíveis dos indivíduos da genealogia. Indivíduos com pigmentação normal têm pelo menos um alelo dominante *A*, podendo ser homozigóticos *AA* ou heterozigóticos *Aa*. Se um indivíduo com pigmentação normal teve algum descendente albino, ou se um de seus genitores é albino, ele é certamente heterozigótico. Indivíduos albinos são homozigóticos recessivos *aa*.

Homens com visão normal têm genótipo X^DY, enquanto homens daltônicos são X^dY. Mulheres com visão normal têm pelo menos um alelo normal X^D, podendo ser homozigóticas X^DX^D ou heterozigóticas X^DX^d. Se uma mulher com visão normal teve um filho daltônico ou se é filha de pai daltônico, será certamente heterozigótica. As mulheres daltônicas são homozigóticas recessivas X^dX^d.

Com base nessas premissas, os genótipos dos diversos indivíduos são:

I-1 = $aa\ X^DX-$
I-2 = $A\_\ X^dY$
I-3 = $A\_\ X^dY$
I-4 = $aa\ X^dX^d$
II-1 = $A\_\ X^dY$
II-2 = $aa\ X^DX-$
II-3 = $Aa\ X^DY$
II-4 = $Aa\ X^dX^d$
III-1 = $Aa\ X^DX^d$
III-2 = $A\_\ X^dY$

A primeira pergunta do problema refere-se à probabilidade de uma criança filha do casal III-1 × III-2 ser albina e não apresentar daltonismo. O genótipo de III-1 foi determinado e é *Aa* X^DX^d. O homem III-2 é X^dY, mas pode ser tanto homozigótico *AA* quanto heterozigótico *Aa*. Assim, uma criança filha desse casal só será albina se III-2 for heterozigótico *Aa*; essa probabilidade é estimada em $\frac{2}{3}$, uma vez que seus pais (II-3 e II-4) são ambos heterozigóticos. No caso de III-2 ser heterozigótico, a chance de uma criança sua filha com III-1 vir a ser albina é $\frac{1}{4}$, como pode ser visto no esquema a seguir.

Pais	*Aa* × *Aa*
Gametas	$\frac{1}{2}A$: $\frac{1}{2}a$ $\frac{1}{2}A$: $\frac{1}{2}a$
Filhos	$\frac{1}{4}AA$: $\frac{1}{4}Aa$: $\frac{1}{4}aA$: $\frac{1}{4}aa$ 3 com pigmentação normal : 1 albino

A probabilidade de uma criança filha do casal III-1 × III-2 ter visão normal é $\frac{1}{2}$, como pode ser visto no esquema a seguir.

Pais	X^DX^d × X^dY
Gametas	$\frac{1}{2}X^D$: $\frac{1}{2}X^d$ $\frac{1}{2}X^d$: $\frac{1}{2}Y$
Filhos	$\frac{1}{4}X^DX^d$: $\frac{1}{4}X^dX^d$: $\frac{1}{4}X^DY$: $\frac{1}{4}X^dY$ Mulher com visão normal Mulher daltônica Homem com visão normal Homem daltônico

A probabilidade conjunta de uma criança ser albina e apresentar daltonismo é de $\frac{1}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$, isso assumindo que o indivíduo III-2 seja heterozigótico; como não temos certeza disso, estimamos essa probabilidade em $\frac{2}{3}$ e multiplicamos $\frac{1}{8} \times \frac{2}{3} = \frac{2}{24}$. A probabilidade calculada em resposta à primeira questão é, portanto, $\frac{1}{12}$.

Na segunda pergunta, admite-se que o casal já teve um primeiro filho albino que não apresentava daltonismo; portanto, temos certeza de que o genótipo de III-2 é *Aa* X^dY. Calculamos, então, a probabilidade de um filho do sexo masculino do casal *Aa* X^DX^d × *Aa* X^dY ser albino e daltônico. Como o problema se refere a um filho do sexo masculino, deve-se excluir a descendência feminina do cálculo. Assim, a probabilidade de um filho do referido casal vir a ser albino é $\frac{1}{4}$, e a probabilidade de ser daltônico é $\frac{1}{2}$. A probabilidade conjunta desses dois eventos é $\frac{1}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$.

A hipótese da compensação de dose

Um fenômeno curioso que ocorre no desenvolvimento embrionário das fêmeas de mamíferos é a inativação de um de seus cromossomos X nas células somáticas; o fenômeno não ocorre em células da linhagem germinativa. O cromossomo X inativo torna-se extremamente condensado e assume, em preparações de células em interfase, o aspecto de um pequeno grânulo, denominado **cromatina sexual**. Células femininas apresentam cromatina sexual, ausente nas células masculinas.

A condensação de um dos cromossomos X das fêmeas de mamíferos é uma estratégia para inativar seus genes, igualando, ou “compensando”, a quantidade de genes ativos em fêmeas e em machos. Essa hipótese, conhecida como **compensação de dose**, foi proposta em 1961 pela pesquisadora inglesa Mary Lyon (1925-2014).

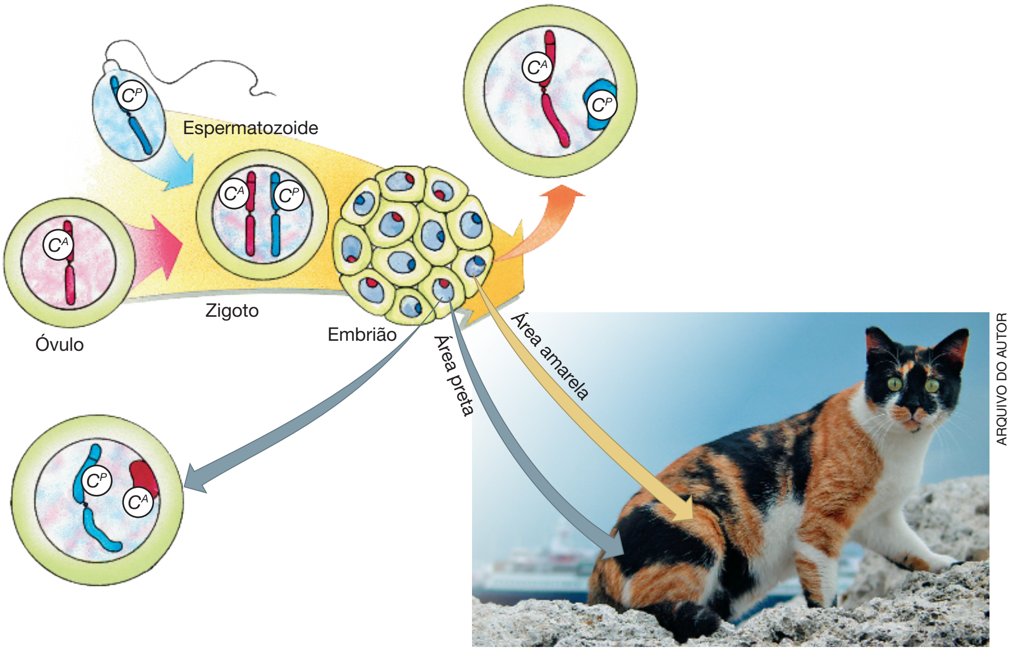
A inativação do cromossomo X ocorre em determinada etapa do desenvolvimento embrionário e persiste daí em diante. Por exemplo, se em uma célula embrionária o cromossomo X de origem paterna foi inativado, todas as descendentes dessa célula terão o mesmo cromossomo inativo.

A inativação pode ocorrer tanto para o cromossomo X materno quanto para o X paterno, com 50% de chance. Assim, o corpo de uma fêmea de mamífero é comparável a um “mosaico” quanto ao cromossomo X: em certas regiões, as células têm ativo o cromossomo X de origem materna e, em outras, o cromossomo X de origem paterna.

Devido à inativação aleatória do cromossomo X, as fêmeas heterozigóticas expressam um dos alelos em certas partes do corpo e o outro alelo nas demais regiões. Isso explica, por exemplo, por que algumas mulheres heterozigóticas para o gene do daltonismo (X^DX^d) têm visão normal em um dos olhos e são daltônicas no outro. Nesse caso, o cromossomo X ativo nas células de um dos olhos é portador do alelo que condiciona visão normal (X^D); no outro olho, o cromossomo X ativo é o que apresenta o alelo para daltonismo (X^d); consequentemente, a mulher é daltônica desse olho.

Mulheres heterozigóticas para o gene da hemofilia (X^HX^h) têm, em geral, metade da quantidade do fator VIII para coagulação em relação às mulheres homozigóticas para o alelo normal. Isso ocorre porque, em cerca de metade das células produtoras desse fator, o cromossomo X inativo é o portador do alelo normal (X^H), enquanto na outra metade o inativo é o portador do alelo mutante (X^h).

A inativação aleatória do cromossomo X das fêmeas de mamíferos pode ser notada em certas linhagens de gatos domésticos (*Felis catus*), em que a pelagem preta e a pelagem amarela são condicionadas por alelos de um gene localizado no cromossomo X. Como os machos possuem somente um cromossomo X, eles nunca têm essas duas cores simultaneamente, pois apresentam apenas um ou outro alelo. As fêmeas heterozigóticas geralmente são malhadas, com partes do corpo pretas e partes amarelas. A explicação para esse fato é que, nas regiões pretas, o cromossomo X inativo é o portador do alelo para amarelo, enquanto nas regiões amarelas o cromossomo X inativo é o portador do alelo para cor preta. (Fig. 3.6)



ARQUIVO DO AUTOR

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Figura 3.6 Em gatas malhadas de preto e amarelo, o cromossomo X no qual se localiza o alelo para cor preta (C^P) está inativo nas regiões amarelas, enquanto o cromossomo X no qual se localiza o alelo para cor amarela (C^A) está inativo nas regiões pretas. A cor branca é efeito de outro gene, que condiciona variegação da pelagem. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Herança ligada ao cromossomo sexual em aves

Os genes localizados no cromossomo Z de aves têm comportamento semelhante ao dos localizados no cromossomo X, mas com padrão de herança inverso, pois nesses animais o sexo heterogamético é o feminino.

Um caso de herança ligada ao cromossomo sexual em galináceos é o da presença ou ausência de listras (ou barras) nas penas. O gene responsável por essa característica localiza-se no cromossomo Z e apresenta dois alelos, um dominante – Z^B –, que condiciona plumagem barrada (carijó), e um recessivo – Z^b –, que condiciona plumagem não barrada. Os genótipos de machos e fêmeas estão representados na tabela a seguir. (Tab. 3.1)

TABELA 3.1 GENÓTIPOS E FENÓTIPOS EM GALINÁCEOS EM RELAÇÃO À PRESENÇA OU AUSÊNCIA DE LISTRAS NAS PENAS

Machos (galos)		Fêmeas (galinhas)	
Genótipo	**Fenótipo**	**Genótipo**	**Fenótipo**
Z^BZ^B	Barrado	Z^BW	Barrada
Z^BZ^b	Barrado	Z^bW	Não barrada
Z^bZ^b	Não barrado		

O cruzamento entre um macho não barrado (Z^bZ^b) e uma fêmea barrada (Z^BW) produz machos barrados (Z^BZ^b) e fêmeas não barradas (Z^bW). O cruzamento dos indivíduos de F_1 entre si produz uma geração F_2 em que 25% são machos barrados (Z^BZ^b), 25% são machos não barrados (Z^bZ^b), 25% são fêmeas barradas (Z^BW) e 25% são fêmeas não barradas (Z^bW).

Quando se cruzam machos barrados de linhagem pura (Z^BZ^B) e fêmeas não barradas (Z^bW), os resultados são bem diferentes do cruzamento anterior. Nesse caso, 100% dos descendentes, tanto machos (Z^BZ^b) quanto fêmeas (Z^BW), são barrados. O cruzamento dos indivíduos de F_1 entre si produz uma F_2 em que todos os machos são barrados, metade homozigótica (Z^BZ^B) e metade heterozigótica (Z^BZ^b). As fêmeas de F_2 são de dois tipos: barradas (Z^BW) e não barradas (Z^bW), metade de cada tipo. (Fig. 3.7)

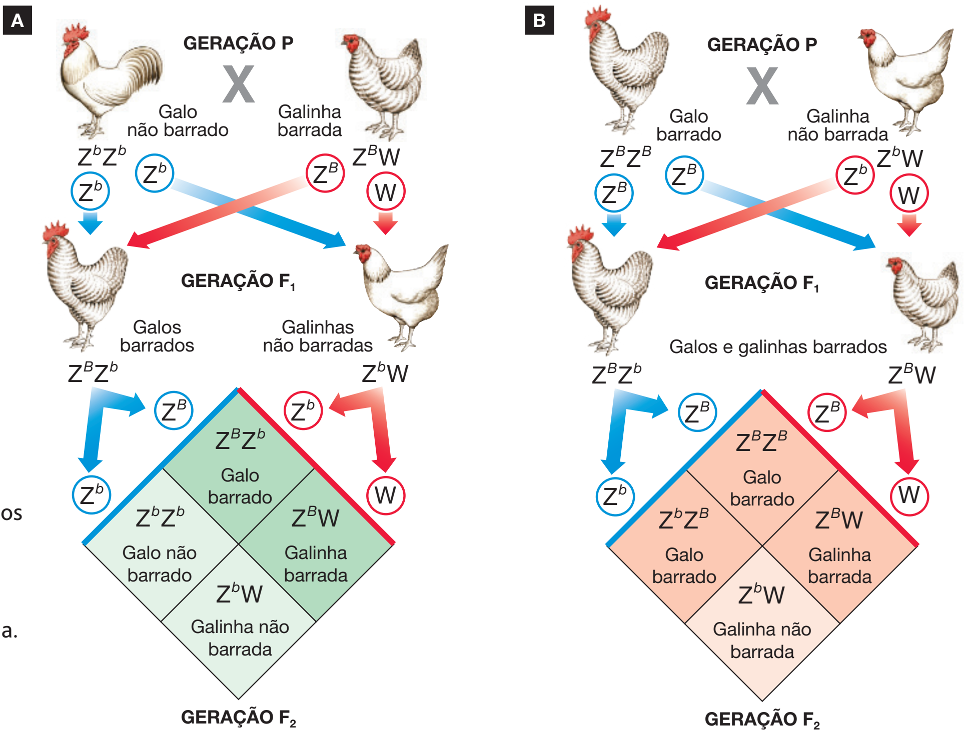

A
GERAÇÃO P
X
Galo não barrado
Galinha barrada
Z^bZ^b
Z^BW
Z^b
Z^b
Z^B
W
GERAÇÃO F_1
Galos barrados
Galinhas não barradas
Z^BZ^b
Z^bW
Z^B
Z^b
Z^b
W
Z^BZ^b
Galo barrado
Z^bZ^b
Galo não barrado
Z^BW
Galinha barrada
Z^bW
Galinha não barrada
GERAÇÃO F_2
B
GERAÇÃO P
X
Galo barrado
Galinha não barrada
Z^BZ^B
Z^bW
Z^B
Z^B
Z^b
W
GERAÇÃO F_1
Galos e galinhas barrados
Z^BZ^b
Z^BW
Z^B
Z^b
Z^B
W
Z^BZ^B
Galo barrado
Z^bZ^B
Galo barrado
Z^BW
Galinha barrada
Z^bW
Galinha não barrada
GERAÇÃO F_2

Figura 3.7 Representação esquemática de dois cruzamentos entre galináceos com plumagem barrada (carijó) e não barrada.
A. Cruzamento de galo não barrado com galinha barrada.
B. Cruzamento de galo barrado com galinha não barrada.

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

Utilize os termos a seguir para responder às questões de 1 a 4.

a) compensação de dose
b) cromatina sexual
c) daltonismo
d) hemofilia A

1. O(A) (▬) é uma condição hereditária ligada ao cromossomo X em que a pessoa não distingue certas cores. 1. c

2. O(A) (▬) é um dos cromossomos X das fêmeas de mamíferos condensado durante a interfase. 2. b

3. A condição hereditária em que falta o fator VIII, necessário à coagulação normal do sangue, é chamada de (▬). 3. d

4. A hipótese do(a) (▬) explica a condensação de um dos cromossomos X em fêmeas de mamíferos. 4. a

Utilize as alternativas a seguir para completar as questões de 5 a 8.

a) Dois tipos de óvulo e um tipo de espermatozoide.
b) Dois tipos de óvulo e dois tipos de espermatozoide.
c) Um tipo de óvulo e um tipo de espermatozoide.
d) Um tipo de óvulo e dois tipos de espermazoide.

5. Uma espécie com sistema de determinação do sexo XY produz, com relação aos cromossomos sexuais, (▬). 5. d

6. Uma espécie com sistema de determinação do sexo X0 produz, com relação aos cromossomos sexuais, (▬). 6. d

7. Uma espécie com sistema de determinação do sexo ZW produz, com relação aos cromossomos sexuais, (▬). 7. a

8. Uma espécie com sistema de determinação do sexo Z0 produz, com relação aos cromossomos sexuais, (▬). 8. a

9. Em uma espécie de gafanhoto, as fêmeas têm 20 cromossomos nas células corporais (somáticas). Nessa espécie, o sistema de determinação do sexo é do tipo X0. Pode-se esperar que: 9. c

a) 100% dos óvulos tenham 10 cromossomos e 100% dos espermatozoides tenham 9 cromossomos.
b) 100% dos óvulos e 100% dos espermatozoides tenham 10 cromossomos.
c) 100% dos óvulos e 50% dos espermatozoides tenham 10 cromossomos, e que 50% dos espermatozoides tenham 9 cromossomos.
d) 100% dos espermatozoides e 50% dos óvulos tenham 10 cromossomos, e que 50% dos óvulos tenham 9 cromossomos.

10. Considere duas espécies, uma com sistema de determinação do sexo XY e outra com sistema ZW. Quem determina o sexo da prole? 10. d

a) A fêmea, em ambos os casos.
b) A fêmea, no primeiro caso, e o macho, no segundo.
c) O macho, em ambos os casos.
d) O macho, no primeiro caso, e a fêmea, no segundo.

11. Um homem afetado por certa doença casa-se com uma mulher saudável. Eles têm oito filhos, sendo quatro meninas e quatro meninos. Todas as meninas têm a doença do pai, e todos os meninos são normais. Que tipo de herança genética provavelmente afeta essa família? 11. b

a) Dominante autossômica.
b) Ligada ao cromossomo X.
c) Recessiva autossômica.
d) Ligada ao cromossomo Y.

12. Considerando um par de genes autossômicos simultaneamente a um gene localizado no cromossomo X, o que se pode afirmar sobre esses genes? 12. d

a) Não têm segregação independente.
b) São ligados.
c) Têm herança poligênica.
d) Têm segregação independente.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

13. Em uma espécie de animal, fêmeas de coloração preta provenientes de uma linhagem pura foram cruzadas com machos de coloração cinza também puros, produzindo, em F_1, machos e fêmeas de coloração preta. Quando os indivíduos F_1 foram cruzados entre si, todas as fêmeas F_2 obtidas apresentaram coloração preta, enquanto os machos eram de dois tipos: 50% pretos e 50% cinza. Explique como se pode determinar qual dos sexos é heterogamético e qual é homogamético.

14. Na espécie humana, qual é a probabilidade de uma criança do sexo masculino apresentar, simultaneamente, um cromossomo X originário da avó materna e um cromossomo Y originário do avô paterno? Desenhe um heredograma para facilitar seu raciocínio.

15. A hemofilia A é uma doença em que o tempo de coagulação do sangue encontra-se muito aumentado em relação ao normal. Além de presente na espécie humana, essa doença também se manifesta no cão doméstico, sendo condicionada por um alelo recessivo (*h*), localizado no cromossomo sexual X. A determinação do sexo em cães segue o sistema XY.

- **a)** Se um cão macho hemofílico for cruzado com uma cadela homozigótica não hemofílica, qual é a proporção esperada na prole de machos e fêmeas, normais e hemofílicos? Quais são os diferentes genótipos apresentados por esses indivíduos?
- **b)** Se uma das cadelas produzidas no cruzamento anterior for cruzada com um macho normal, qual será a proporção esperada na prole de indivíduos machos e fêmeas, normais e hemofílicos? Quais serão os diferentes genótipos desses indivíduos?

16. Em galináceos, o sistema de determinação do sexo é ZW. Um alelo dominante *B*, localizado no cromossomo sexual Z (Z^B), produz penas barradas. Seu alelo recessivo *b* (Z^b) produz penas de cor uniforme em condição homozigótica. O alelo autossômico dominante *R* produz crista rosa e seu alelo recessivo *r* produz crista simples em condição homozigótica. Uma fêmea de penas barradas e crista rosa heterozigótica é cruzada com um macho de cor uniforme e crista simples. Qual é a proporção fenotípica esperada desse cruzamento?

17. A distrofia muscular de Duchenne (DMD) é recessiva e ligada ao cromossomo X. A doença se manifesta na infância e as pessoas afetadas enfraquecem progressivamente, em geral morrendo antes da adolescência.

- **a)** Qual é a probabilidade de um descendente do sexo masculino de uma mulher cujo irmão sofre de DMD ser afetado pela distrofia?
- **b)** Supondo que um tio materno (irmão da mãe) de uma mulher teve DMD, qual é a probabilidade de a mulher ter recebido o alelo?

18. Neste capítulo, aprendemos sobre a herança do daltonismo. Agora, vamos analisar essa condição além dos seus aspectos biológicos. Leia os trechos de reportagem a seguir e siga as orientações.

Falta de padronização das sinalizações prejudica daltônicos no trânsito

O dia a dia de um daltônico no trânsito está longe de ser um caos cheio de obstáculos em preto e branco. O que poucos sabem é que quem sofre dessa disfunção — que provoca dificuldade na diferenciação de cores — pode enxergar obstáculos melhor do que uma pessoa sem problemas de visão. Isso porque os daltônicos aprendem a codificar as cores por meio de associações [...]. Por isso, o que realmente prejudica essas pessoas é a falta de padronização de semáforos, placas e do exame para tirar ou renovar a Carteira Nacional de Habilitação (CNH). [...]

Como o daltônico trabalha com associação do nome da cor à tonalidade e contraste que vê, ele está apto a dirigir. "Pela resolução 80/98 do Código de Trânsito Brasileiro, ele precisa apenas saber reconhecer as cores vermelha, amarela e verde. E isso ele vai saber fazer, porque aprendeu a relacionar o nome com o tom que enxerga", argumenta [o médico oftalmologista] Queiroz Neto. [...]

[Um] problema que os daltônicos enfrentam é a falta de padrão de semáforos e placas de uma cidade para outra. Para os daltônicos, o contraste é essencial para melhorar a visibilidade no trânsito. Placas com letras amarelas sobre verde e azul, comuns em pequenas cidades, se tornam [ilegíveis] para daltônicos. As placas de obras, com fundo laranja e letras em preto, também dificultam a identificação. "Para ajudar, a sinalização viária deveria ser feita com materiais reflexivos, que melhoram a visão noturna, e nas cores estabelecidas pela lei", destaca o médico. [...]

Disponível em: <http://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,,MRP1527656-9658,00.html>.
Acesso em: abr. 2016.

A matéria menciona uma das dificuldades que daltônicos enfrentam para exercer seu direito de dirigir. Escreva um texto dissertativo sobre o tema "inclusão social" com foco no assunto da reportagem. Para sua dissertação, levante informações relevantes, como: a sinalização de trânsito na sua cidade é adequada para daltônicos? Caso não seja, há algum projeto para corrigir isso? Além do trânsito, que outros espaços públicos carecem de sinalização adequada para daltônicos?

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFSCar-SP) A hemofilia é uma doença recessiva ligada ao sexo, que se caracteriza pela dificuldade de coagulação do sangue. Em um casal em que a mulher é heterozigota para a hemofilia e o marido é normal, a probabilidade de nascimento de uma criança do sexo masculino e hemofílica é 1. c

a) $\frac{1}{2}$

b) $\frac{1}{3}$

c) $\frac{1}{4}$

d) $\frac{1}{8}$

e) $\frac{3}{4}$

2. (UEL-PR) Em algumas modalidades esportivas, as equipes devem ser formadas apenas por atletas do mesmo sexo. Sobre as características que determinam ou diferenciam o sexo, é correto afirmar: 2. a

a) O sexo masculino depende de um gene determinador do sexo localizado no cromossomo Y.

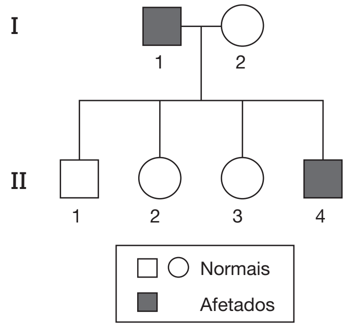
b) A progesterona atua no desenvolvimento de órgãos genitais típicos do sexo masculino.

c) Os núcleos das células feminina e masculina apresentam um mesmo conjunto cromossômico.

d) A testosterona é o principal hormônio sexual feminino produzido nas trompas.

e) As células masculinas apresentam cromatina sexual.

3. (UFMG) Analise este heredograma, em que está representada a herança do daltonismo, condicionada por gene recessivo localizado no cromossomo X:



ADILSON SECCO

Considerando as informações contidas nesse heredograma e outros conhecimentos sobre o assunto, é correto afirmar que 3. a

a) o indivíduo I.2 apresenta o fenótipo normal e é portador do gene do daltonismo.

b) o indivíduo II.4 recebeu o gene do daltonismo de qualquer um de seus genitores.

c) os casais como I.1 e I.2 têm maior probabilidade de ter filhos do sexo masculino daltônicos.

d) os filhos do sexo masculino de II.2 serão daltônicos, independentemente do genótipo do seu pai.

4. (Fuvest-SP) No início do desenvolvimento, todo embrião humano tem estruturas que podem se diferenciar tanto no sistema reprodutor masculino quanto no feminino. Um gene do cromossomo Y, denominado SRY (sigla de *sex-determining region* Y), induz a formação dos testículos. Hormônios produzidos pelos testículos atuam no embrião, induzindo a diferenciação das outras estruturas do sistema reprodutor masculino e, portanto, o fenótipo masculino. Suponha que um óvulo tenha sido fecundado por um espermatozoide portador de um cromossomo Y com uma mutação que inativa completamente o gene SRY. Com base nas informações contidas acima, pode-se prever que o zigoto 4. d

a) será inviável e não se desenvolverá em um novo indivíduo.

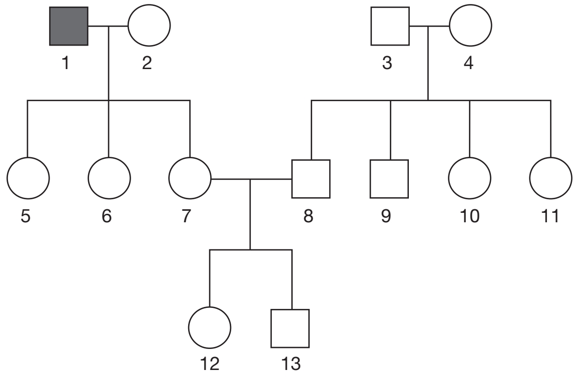
b) se desenvolverá em um indivíduo cromossômica (XY) e fenotipicamente do sexo masculino, normal e fértil.

c) se desenvolverá em um indivíduo cromossômica (XY) e fenotipicamente do sexo masculino, mas sem testículos.

d) se desenvolverá em um indivíduo cromossomicamente do sexo masculino (XY), mas com fenótipo feminino.

e) se desenvolverá em um indivíduo cromossômica (XX) e fenotipicamente do sexo feminino.

5. (Fuvest-SP) No heredograma abaixo, o símbolo ■ representa um homem afetado por uma doença genética rara, causada por mutação num gene localizado no cromossomo X. Os demais indivíduos são clinicamente normais. 5. d



ADILSON SECCO

As probabilidades de os indivíduos 7, 12 e 13 serem portadores do alelo mutante são, respectivamente,

a) 0,5; 0,25 e 0,25

b) 0,5; 0,25 e 0

c) 1; 0,5 e 0,5

d) 1; 0,5 e 0

e) 0; 0 e 0

Questão discursiva

6. (UFRRJ) Uma pessoa portadora de hemofilia que tenha mãe e pai normais faz a seguinte pergunta a um médico: Doutor, eu herdei esta característica do meu pai?

O médico responde: Não, seguramente foi de sua mãe.

a) Identifique qual o sexo da pessoa.

b) Justifique sua resposta.

Capítulo 4

Genética e biotecnologia na atualidade

VISIONS/DIOMEDIA

Flor de dália (*Dahlia* sp.) mostrando o efeito da ativação diferencial de um gene responsável pela cor das pétalas. O gene, que codifica o pigmento vermelho, foi ativado nas células das áreas coloridas e desativado nas áreas brancas durante a formação da flor. A flor de dália mede cerca de 15 cm de diâmetro.

A manipulação dos genes

Em fevereiro de 2001, duas importantes revistas científicas, a inglesa *Nature* e a estadunidense *Science*, publicaram o sequenciamento do genoma humano, isto é, a sequência de bases nitrogenadas das moléculas de DNA dos 24 tipos de cromossomos de nossa espécie.

O Projeto Genoma Humano, iniciado formalmente em outubro de 1990, propiciou o desenvolvimento de novas tecnologias que resultaram em métodos mais eficientes e baratos de análise de genomas. Hoje, inúmeras espécies tiveram seu genoma sequenciado, abrindo caminho para grandes progressos na Genética e para a aplicação dos novos conhecimentos.

Diariamente, os jornais trazem relatos de organismos transgênicos, clonagem de animais e identificação molecular de pessoas, temas que há alguns anos não passavam de ficção científica. Hoje é possível transferir genes de pessoas para plantas, de modo que vegetais possam produzir proteínas genuinamente humanas! Com a implantação de genes humanos em vacas e ovelhas, esses animais passam a secretar, no leite, proteínas humanas de interesse comercial. Genes selecionados são introduzidos em bactérias, que se transformam, dessa forma, em verdadeiras fábricas de proteínas, empregadas em pesquisa científica e na produção de medicamentos. Alguns genes de porcos são substituídos por genes humanos com o objetivo de gerar linhagens de suínos aptos a fornecer órgãos para transplantes em pessoas, com menos riscos de rejeição.

A solicitação judicial de exames de DNA para testes de paternidade está se tornando cada vez mais comum: algumas células da bochecha, retiradas com cotonete, são suficientes para realizar o exame e constatar se um homem é ou não o pai de uma criança. Em investigações criminais, um único fio de cabelo encontrado no local do crime pode permitir a identificação do suspeito por meio da análise do DNA da raiz capilar. Antropólogos têm utilizado técnicas da Genética Molecular para estudar as relações entre populações de diversas partes do planeta e rastrear a história da espécie humana. Historiadores têm analisado o DNA de restos mortais humanos encontrados em escavações arqueológicas para estabelecer relações de parentesco que permitam compreender a organização social de civilizações antigas.

De acordo com o pesquisador estadunidense David Baltimore (1938-), ganhador do prêmio Nobel em Fisiologia e Medicina de 1975, “com a conclusão do sequenciamento do genoma humano, todos precisamos adquirir noções suficientes de ciência para poder compreender os avanços do conhecimento e aplicá-los conscientemente”.

Em 1956, em seu livro *Ciência e valores humanos*, o filósofo, cientista e educador polonês Jacob Bronowski (1908-1974) já alertava para a necessidade da educação científica para uma participação social consciente e responsável. Disse ele: "[…] devemos tremer sempre que ouvimos um homem de sensibilidade considerar a ciência um assunto que pertence a outra pessoa. Hoje em dia, o mundo é feito, é potencializado, pela ciência, e qualquer pessoa que abdique de seu interesse pela ciência caminha de olhos abertos para a escravatura".

A importância do assunto

Os conhecimentos sobre a natureza do DNA e da codificação genética, aprimorados nas décadas de 1950 e 1960, foram rapidamente aplicados no desenvolvimento de tecnologias de manipulação dos genes. Essas recentes tecnologias de manipulação do DNA, que compõem a chamada Engenharia Genética, foram desenvolvidas basicamente com o uso de bactérias e vírus como seres experimentais.

Neste capítulo, veremos como é feita a manipulação genética dos organismos por meio de cruzamentos dirigidos e de técnicas de manipulação do DNA e como os conhecimentos na área de Genética têm gerado novas tecnologias, cuja aplicação, algumas vezes, tem provocado acirrados debates na sociedade, como é o caso dos organismos geneticamente modificados ou OGMs. Essa e outras aplicações do conhecimento genético, como a identificação de pessoas pelo DNA, envolvem posições éticas e políticas; para participar conscientemente dessas discussões, é necessário dispor de informações corretas. Acompanhe-nos e descubra esse e outros grandes impactos da Genética na sociedade contemporânea.

4.1 O controvertido conceito de gene

O termo **gene** foi criado em 1909 pelo pesquisador dinamarquês Wilhelm Ludvig Johannsen (1857-1927) e logo adotado pelos cientistas em substituição ao termo "fator hereditário", introduzido por Mendel em meados do século XIX. Durante décadas, o conceito de gene foi atualizado de acordo com os conhecimentos genéticos da época. Porém, com a quantidade de novas informações sobre a estrutura e o funcionamento do material genético, geradas pelo impressionante desenvolvimento da Genética Molecular nas últimas décadas, tem sido difícil adequar o conceito de gene aos novos tempos. Há até mesmo cientistas que consideram o conceito de gene ultrapassado e sugerem que deixe de ser utilizado.

A ironia é que nunca, na história da Genética, o termo gene teve tanto destaque como nos dias atuais. Aboli-lo poderia trazer mais problemas que soluções, principalmente para aqueles que não são especialistas. No âmbito deste livro, uma definição que permite incorporar dados moleculares sem abalar a visão clássica é: **gene** corresponde a um segmento de DNA com informação para a síntese de um polipeptídio ou de um RNA. Na sequência, esse conceito será consolidado e ampliado.

Os limites de um gene

Cada cromossomo é constituído por uma única molécula de DNA, com milhões de pares de bases e milhares de informações genéticas; cada informação pode ser considerada um gene. A expressão de cada um desses genes sempre ocorre por meio da transcrição gênica, que consiste em transcrever a sequência de bases nitrogenadas de um segmento da molécula de DNA para uma molécula de RNA. Uma pergunta que intrigou os cientistas durante muito tempo foi: o que define o início e o fim do segmento de DNA a ser transcrito? Em outras palavras, quais são os limites de um gene?

Hoje se sabe que o início de transcrição é definido por uma sequência especial de pares de bases nitrogenadas na dupla-hélice de DNA. Essa sequência de bases nitrogenadas, conhecida como **região promotora do gene**, determina o local em que se encaixará a enzima polimerase do RNA para iniciar a síntese de RNA.

Após se encaixar à região promotora do gene, a polimerase do RNA vai separando a dupla-hélice do DNA e utilizando uma das cadeias como molde para a formação de RNA. O processo continua até que a polimerase do RNA encontre uma sequência específica de bases nitrogenadas, a chamada **sequência de término de transcrição**, que marca o fim do processo. Portanto, todo gene tem um início, a região promotora, e um fim, a sequência de término de transcrição. (Fig. 4.1)

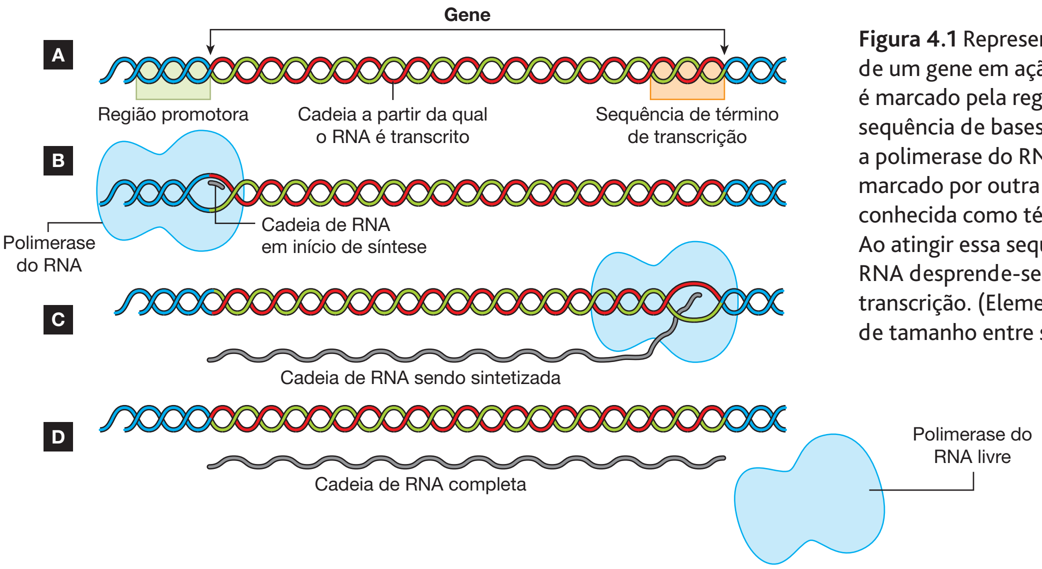

Gene
A
Região promotora
Cadeia a partir da qual o RNA é transcrito
Sequência de término de transcrição
B
Polimerase do RNA
Cadeia de RNA em início de síntese
C
Cadeia de RNA sendo sintetizada
D
Cadeia de RNA completa
Polimerase do RNA livre

Figura 4.1 Representação esquemática de um gene em ação. O início do gene é marcado pela região promotora, uma sequência de bases do DNA à qual se liga a polimerase do RNA; o final do gene é marcado por outra sequência de bases, conhecida como término de transcrição. Ao atingir essa sequência, a polimerase do RNA desprende-se do DNA, finalizando a transcrição. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Diferença entre genes bacterianos e genes eucarióticos

O grande desenvolvimento da Genética e da Bioquímica mostrou que, apesar de a maior parte das formas de vida compartilhar o mesmo código genético, a maneira como as informações genéticas estão estruturadas nos cromossomos e o modo como elas são transcritas e traduzidas diferem marcadamente entre bactérias e seres eucarióticos.

Uma das diferenças refere-se à organização da informação genética. Em bactérias, a sequência de aminoácidos de um polipeptídio corresponde exatamente à sequência de bases do DNA que foi transcrito para o RNAm, ou, como dizem os geneticistas, há colinearidade entre as cadeias polipeptídicas e os segmentos de DNA que as codificam. Nos genes eucarióticos, por outro lado, a sequência de bases do DNA que codifica os aminoácidos está intercalada com sequências que não participam diretamente da codificação. É como se introduzíssemos palavras, frases ou parágrafos sem sentido em determinados pontos de um texto; a informação original continua lá, mas está interrompida por trechos sem significado, que têm de ser eliminados da leitura para que a informação seja compreendida.

Os trechos de um gene eucariótico que contêm informação para aminoácidos são denominados **éxons** (do inglês *expressed region*, região expressa); os trechos intercalares, que não codificam aminoácidos, são denominados **íntrons** (do inglês *intragenic region*, região intragênica). (Fig. 4.2)

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

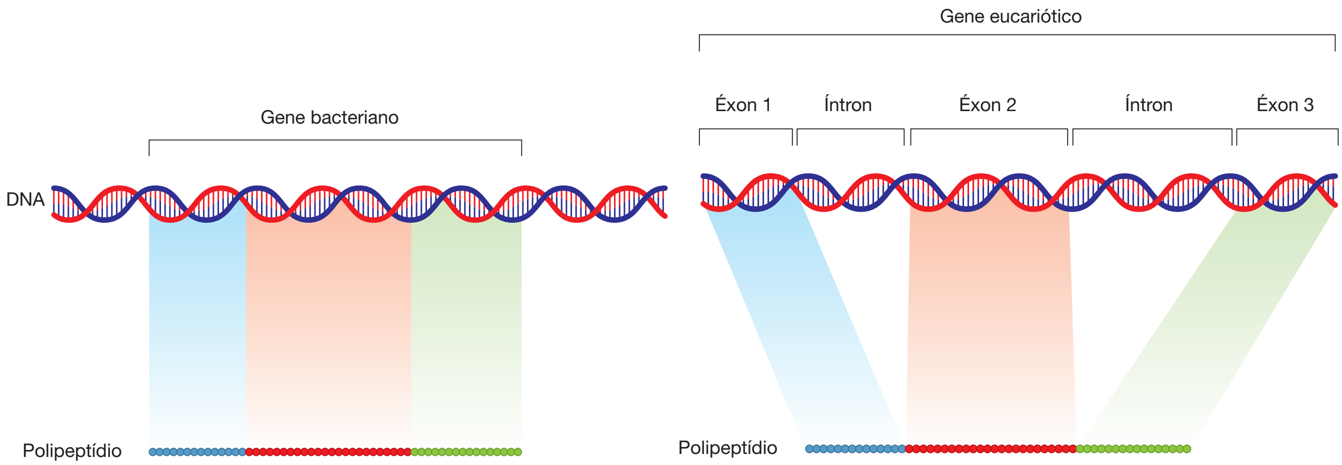

Gene bacteriano
DNA
Polipeptídio
Gene eucariótico
Éxon 1
Íntron
Éxon 2
Íntron
Éxon 3
Polipeptídio

Figura 4.2 Representação esquemática da organização de um gene não interrompido de uma bactéria e de um gene interrompido de organismo eucariótico. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Splicing genético: corte e emenda do RNA

A descoberta de que as informações genéticas dos organismos eucarióticos são interrompidas criou um novo desafio para os cientistas: como explicar que a partir de um DNA contendo íntrons é produzido um RNAm com a sequência de aminoácidos do polipeptídio?

No processo de transcrição gênica de seres eucarióticos o segmento de DNA correspondente a um gene é lido de ponta a ponta, de modo que o RNA produzido, denominado pré-RNA mensageiro, contém tanto éxons quanto íntrons. Esse RNA sofre, então, cortes nos limites entre os éxons e os íntrons. Os íntrons são degradados e os éxons são unidos em sequência para constituir o RNA mensageiro. O processo de “edição” do RNA por meio de cortes, eliminação dos íntrons e emenda dos éxons é chamado ***splicing***, termo da língua inglesa que significa “corte e emenda”.

Dependendo do tipo de célula, um mesmo pré-RNA mensageiro pode sofrer tipos variados de *splicing*. Em outras palavras, nos diversos tipos de célula de um organismo pode haver diferentes tipos de segmentos eliminados, de modo que o mesmo pré-RNA mensageiro origina RNA mensageiros com informações genéticas diferentes; é o que os cientistas denominam ***splicing* alternativo** do RNA. Estima-se que aproximadamente 95% dos genes humanos formados por múltiplos éxons apresentam *splicing* alternativo, o que explica por que o número de tipos de proteínas é muito superior ao número de genes. (Fig. 4.3)

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

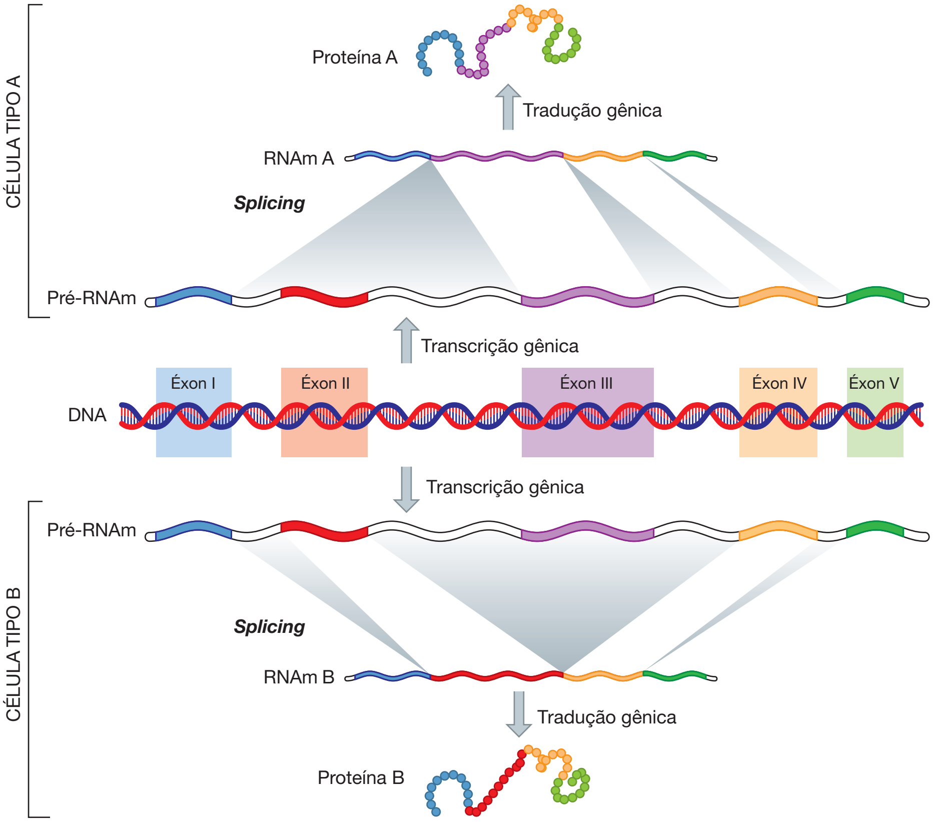


Figura 4.3 Representação esquemática do *splicing* alternativo de um pré-RNA mensageiro em dois tipos de célula, o que resulta em dois tipos diferentes de proteína, A e B. Na célula A, o éxon II foi removido pelo *splicing*; assim, esse segmento não está presente no RNAm e, portanto, não codifica aminoácidos na proteína. Na célula B, por sua vez, o *splicing* removeu o éxon III. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

4.2 Melhoramento genético

A maioria das plantas, dos animais e dos demais organismos (como fungos e algas) que constituem nossa alimentação básica foi domesticada e vem sendo “melhorada” em diferentes regiões do mundo, há milhares de anos, desde muito antes da descoberta dos mecanismos da herança biológica.

O **melhoramento genético** consiste em selecionar e aprimorar as qualidades das espécies, tendo em vista sua utilização pelos seres humanos. Inicialmente, esse melhoramento era feito apenas de forma intuitiva. Para obter espigas de milho com maior número de grãos, por exemplo, os agricultores selecionavam para o plantio apenas sementes de espigas com grande número de grãos. Para aumentar o peso médio das galinhas, empregavam-se como reprodutores os galos e as galinhas maiores e mais pesados.

Com o conhecimento de novos conceitos e o desenvolvimento de novas técnicas genéticas, tornou-se possível racionalizar e aperfeiçoar a seleção. O melhoramento das espécies passou a basear-se em métodos científicos.

Ao mostrar que quase todas as qualidades de valor econômico, como a fertilidade de animais e plantas, o tamanho e a quantidade dos grãos, a produção de carne, de leite e de ovos, a resistência a doenças etc., são condicionadas por genes que interagem fortemente com fatores ambientais, a Genética deu uma importante contribuição para a agricultura e para a pecuária. Esse conhecimento tornou possível o desenvolvimento de técnicas mais eficientes de seleção e de melhoramento de características de animais e plantas dotados de importância econômica. (Fig. 4.4)

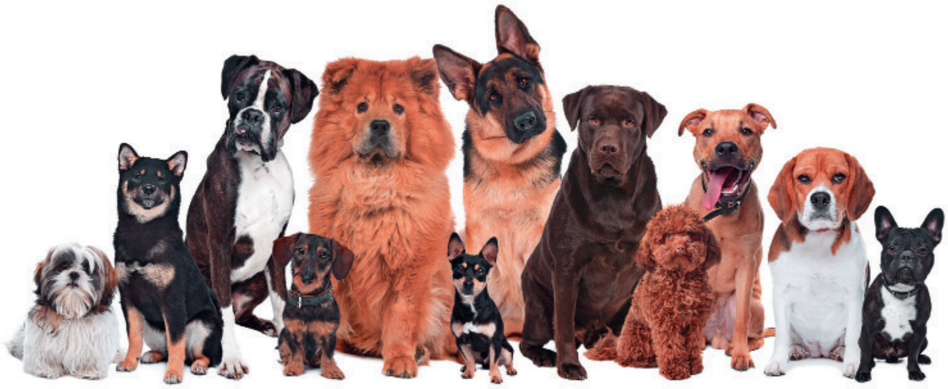
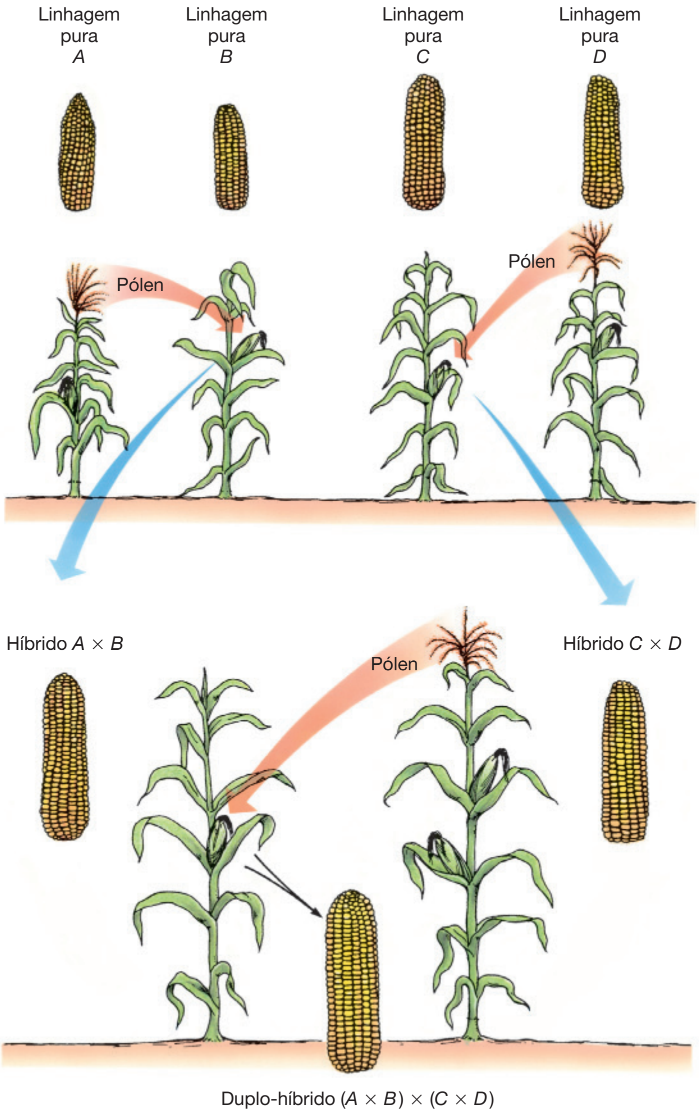

ERIK LAM/SHUTTERSTOCK

Figura 4.4 Diversas raças de cães foram obtidas por criadores de animais que realizavam cruzamentos seletivos para obter características de interesse específicas.

Heterose ou vigor híbrido

Em 1909, o geneticista estadunidense George H. Shull (1874-1954) percebeu que o cruzamento entre duas determinadas variedades de milho produzia, em relação às variedades parentais, plantas mais vigorosas, mais resistentes a doenças e com espigas maiores e mais uniformes. Essas plantas foram denominadas híbridas, termo utilizado também para designar o produto do cruzamento entre linhagens diferentes de uma mesma espécie. Concluiu-se que, no caso do milho, as plantas híbridas apresentavam qualidades superiores às linhagens puras (altamente homozigóticas) por possuírem muitos genes em condição heterozigótica. Esse fenômeno recebeu o nome de **heterose** ou vigor híbrido.

O conhecimento da base genética do vigor híbrido no milho permitiu a produção de duplos-híbridos, isto é, obtidos a partir de quatro linhagens homozigóticas parentais. Esse tipo de cruzamento teve tanto sucesso que hoje a maior parte de todo o milho consumido no mundo é duplo-híbrido. O fenômeno da heterose não se restringe ao milho, ocorrendo também em outras plantas, como o morango, o tomate, o algodão e a cebola, e em espécies animais, como a galinha doméstica. (Fig. 4.5)



ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Figura 4.5 Representação esquemática dos cruzamentos utilizados na obtenção do milho duplo-híbrido a partir de quatro linhagens puras parentais. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Problemas decorrentes do melhoramento genético

Um dos problemas decorrentes do melhoramento genético é o surgimento de linhagens com pouca variabilidade, isto é, com pouca diferença genética entre os indivíduos, o que reduz a capacidade da população de se adaptar eficientemente a alterações ambientais. Os antigos agricultores, mesmo antes do desenvolvimento da Genética, já lidavam com esse problema. Em campos de trigo, era comum o plantio de diversas variedades, o que aumentava a chance de preservar ao menos parte da lavoura em caso de seca, enchente ou pragas.

Essa técnica milenar atualmente tem sido negligenciada. Hoje predominam as lavouras de monocultura, em que grandes áreas são ocupadas com uma única variedade da espécie. Apesar de as monoculturas produzirem lucros maiores em curto prazo, há o risco de uma praga dizimar completamente uma plantação sem encontrar indivíduos resistentes, já que todas as plantas são geneticamente muito semelhantes.

Exemplo histórico de um desastre envolvendo a perda de uma monocultura ocorreu em meados do século XIX na Irlanda, onde a produção de batata, um dos principais alimentos da população na época, baseava-se em uma única variedade. Uma doença causada por microrganismos dizimou, em curtíssimo prazo, praticamente todas as plantações de batata desse país. O resultado foi catastrófico: morte de milhões de pessoas em decorrência da fome.

Em 1970, uma doença provocada por um fungo atacou as culturas de milho híbrido no sul dos Estados Unidos, reduzindo à metade a safra prevista. Estudos realizados pelo governo estadunidense mostraram que suas culturas de milho eram geneticamente uniformes e muito vulneráveis a doenças. Essas culturas foram recuperadas com a introdução de um alelo para resistência ao fungo causador da doença, obtido em uma variedade de milho nativa da Colômbia.

Nos dias de hoje, assuntos como clonagem e transgenia são comuns nas diferentes mídias. Porém, a maioria das pessoas ainda tem muitas dúvidas sobre essas técnicas. Proponha que os alunos formem grupos e entrevistem algumas pessoas de diferentes idades e grau de escolaridade para conhecer algumas perguntas que essas pessoas gostariam que fossem respondidas a respeito desse assunto. Em sala de aula, reúna as questões trazidas pelos estudantes e, juntos, busquem respondê-las. Incentive a participação dos estudantes, ajudando-os na pesquisa na internet, em livros ou revistas. As perguntas e respectivas respostas podem ser disponibilizadas nas redes sociais ou compartilhadas em aplicativos de mensagem. Se achar conveniente e houver disponibilidade, convide um especialista no tema para falar sobre o assunto com a classe e permita que os alunos façam perguntas e tirem suas dúvidas.

4.3 Engenharia Genética

Vamos recordar os primórdios da Genética, em meados do século XIX, quando Gregor Mendel realizou suas experiências com ervilhas. Os fatores hereditários, então propostos pelo monge-cientista para explicar a hereditariedade, ainda levariam algumas décadas para ser identificados e localizados nos seres vivos.

No começo do século XX, os fatores hereditários, já então batizados de genes, foram localizados nos cromossomos. Quarenta anos mais tarde, quase na metade do século XX, descobriu-se que os genes eram constituídos de DNA. Pouco mais de uma década depois, nos anos 1960, o código genético foi finalmente decifrado.

Desde então, passos rápidos levaram à **Engenharia Genética**, um conjunto de técnicas de manipulação do DNA que permite isolar e multiplicar genes, e também transferi-los de um indivíduo para outro, mesmo entre espécies distintas. Os próximos anos prometem descobertas surpreendentes e possibilidades ainda mais espetaculares nesse campo de pesquisa, mais apropriadamente chamado **tecnologia do DNA recombinante**, como veremos a seguir.

Milho, drosófilas e camundongos, entre outras plantas e animais, tiveram e ainda têm seu lugar nos estudos genéticos. Mas são os seres microscópicos – bactérias e vírus – as principais "cobaias" da Engenharia Genética. Graças à sua relativa simplicidade, eles se tornaram o material biológico ideal para compreender o mecanismo básico de funcionamento dos genes.

Em condições ideais, uma única bactéria é capaz de se duplicar a cada 20 ou 30 minutos. Em um dia, poderíamos ter cerca de 48 duplicações. Calcule quantos descendentes haverá no dia seguinte usando a fórmula 2^n, em que n é o número de duplicações. Resultado: 2^{48} novas bactérias. Isso significa mais de 1 quatrilhão de novos microrganismos gerados assexuadamente em apenas um dia! E teoricamente (isto é, se não ocorrerem mutações), todos são geneticamente idênticos, constituindo o que os cientistas chamam de **clone**. Esse termo (do grego *klón*, broto) significa o conjunto de indivíduos originados de um único genitor por meio de reprodução assexuada.

Mais recentemente, o significado dos termos clone e clonagem foi ampliado. Hoje, fala-se em "clonagem" de telefones celulares e de cartões de crédito. Clonar é realizar uma ou várias cópias de genes, de células de organismos e, por extensão, dos códigos únicos dos celulares ou dos cartões de crédito. Note como a aplicação de conhecimentos e tecnologias faz com que as pessoas se apropriem de conceitos antes restritos aos laboratórios de pesquisa.

“Tesouras” moleculares: endonucleases de restrição

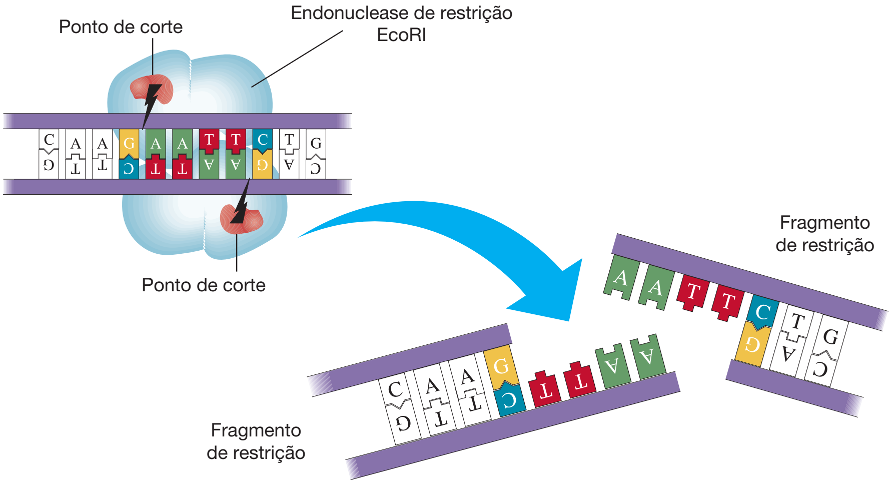
No início dos anos 1970, descobriu-se que certas enzimas bacterianas podiam cortar moléculas de DNA em pontos específicos. Os cientistas acreditam que essas enzimas, denominadas **endonucleases de restrição**, são defesas desenvolvidas por bactérias contra vírus bacteriófagos. Assim que certos bacteriófagos injetam seu material genético na bactéria, entram em ação as endonucleases de restrição bacterianas, que “picotam” o DNA viral infectante em pontos específicos, inativando o ataque.

As endonucleases de restrição agem como “tesouras” moleculares, reconhecendo sequências específicas de bases em moléculas de DNA e cortando-as nesses pontos. Há vários tipos de endonuclease de restrição, todos altamente específicos: cada um reconhece e corta o DNA apenas onde houver determinada sequência de nucleotídios, em geral constituída por 4 ou 6 pares de bases nitrogenadas. (Fig. 4.6 e Tab. 4.1)

A descoberta das endonucleases de restrição trouxe grandes avanços à Genética. Os cientistas viram nelas “ferramentas” bioquímicas para cortar moléculas de DNA de forma controlada e previsível, o que possibilitou análises do material genético antes inviáveis.

Moléculas idênticas de DNA, ao ser submetidas a determinada endonuclease de restrição, são cortadas exatamente nos mesmos pontos, originando fragmentos de tamanhos iguais.

Em contrapartida, moléculas de DNA com diferentes sequências de nucleotídios, quando cortadas por uma endonuclease de restrição, originam fragmentos de DNA de diferentes tamanhos. O mais interessante é que, ao analisar os fragmentos obtidos das diferentes moléculas cortadas, pode-se notar um padrão típico para cada DNA analisado. Isso levou os cientistas a pensar na possibilidade de identificar indivíduos pela análise dos fragmentos de DNA, após o corte por endonucleases de restrição. Esse assunto será tratado mais adiante, no quadro *Ciência e cidadania*.



ADILSON SECCO

TABELA 4.1 SÍTIO DE AÇÃO E BACTÉRIA DE ORIGEM DE ALGUMAS ENDONUCLEASES

Nome da endonuclease	Bactéria de origem	Sítio de ação
AhaIII	*Aphanothece halophytica*	5' – TTT AAA – 3' 3' – AAA TTT – 5'
BamHI	*Bacillus amyloliquefaciens H*	5' – GGATCC – 3' 3' – CCTAGG – 5'
EcoRI	*Escherichia coli RY 13*	5' – GAATTC – 3' 3' – CTTAAG – 5'
HindIII	*Haemophilus influenzae Rd*	5' – AAGCTT – 3' 3' – TTCGAA – 5'
TaqI	*Thermus aquaticus YTI*	5' – TCGA – 3' 3' – AGCT – 5'

Figura 4.6 Representação esquemática do modo de ação da endonuclease de restrição EcoRI (lê-se “eco erre um”). A tabela mostra, na coluna da direita, os sítios de corte (indicados pelas setas vermelhas) e as sequências de reconhecimento de algumas endonucleases de restrição e, na coluna do meio, a linhagem de bactéria que produz cada uma dessas enzimas. O nome de uma endonuclease de restrição geralmente é composto pelas iniciais do nome da espécie da bactéria e, às vezes, pela sigla da linhagem bacteriana da qual ela é extraída.

Separação eletroforética de fragmentos de DNA

A análise dos fragmentos de DNA originados pelo corte com determinada endonuclease de restrição é feita pela técnica de **eletroforese** (do grego *phóresis*, ação de transportar, migração). Essa técnica também é capaz de separar outras moléculas orgânicas, como RNA e proteínas, com condições específicas para cada uma delas.

Nesse caso, a eletroforese consiste em colocar os fragmentos de DNA em uma matriz de gel imersa em uma solução tampão, que atua na condução da corrente elétrica e na manutenção do pH do meio, e submetê-la a uma corrente elétrica; a extremidade do gel em que o DNA foi colocado é conectada ao polo negativo, e a extremidade oposta, ao polo positivo.

Com a diferença de potencial elétrico gerada entre as extremidades da placa de gel, os fragmentos de DNA, que têm carga elétrica negativa devido à ionização de seus grupos fosfatos, migram para o polo positivo. Esses fragmentos moleculares deslocam-se no interior do gel "driblando" as fibras desse material, como se estivessem em uma corrida de obstáculos. Quanto menor é o tamanho de um fragmento de DNA, mais facilmente ele passa entre as fibras, sendo assim mais veloz. Nessa corrida eletroforética, portanto, sabe-se antecipadamente quem vai chegar na frente: os fragmentos menores de DNA. Atrás vêm os fragmentos um pouco maiores e assim por diante.

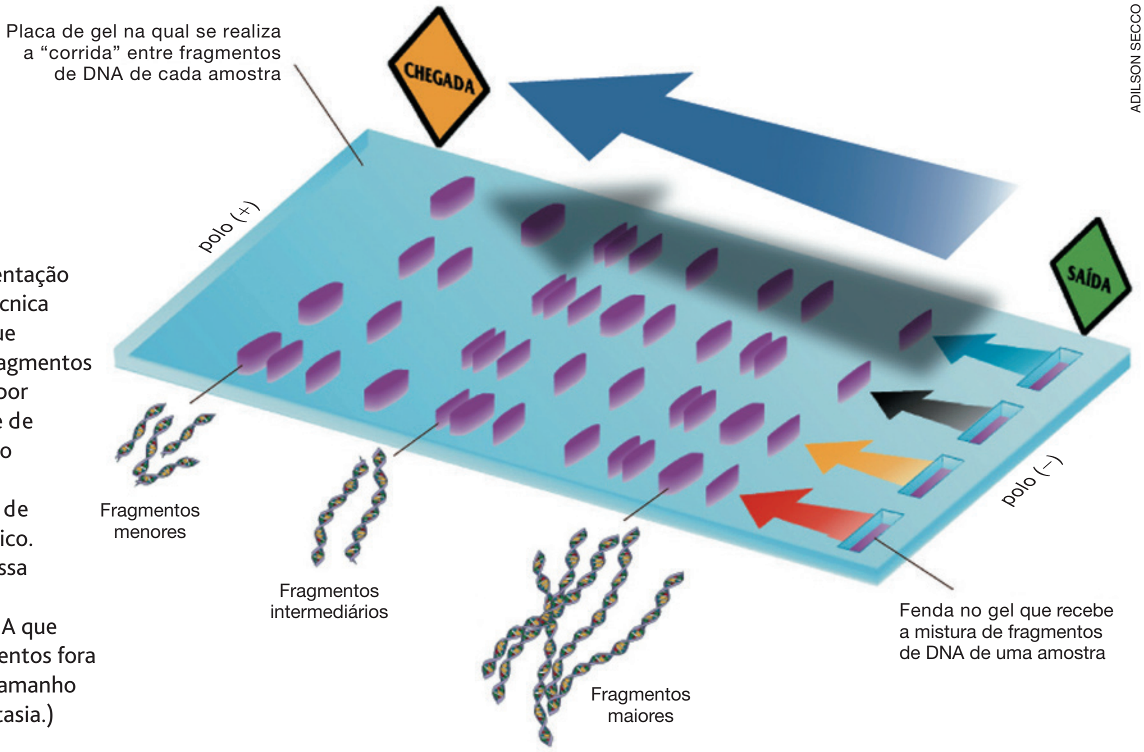
Quando o campo elétrico é desligado, fragmentos de DNA de mesmo tamanho e que corriam lado a lado "estacionam" juntos em determinada posição, formando uma faixa na placa de gel. Por exemplo, se houver 12 tipos de fragmentos de DNA de diferentes tamanhos, após a eletroforese haverá 12 faixas separadas, correspondentes aos 12 tamanhos de fragmentos.

Terminada a eletroforese, a placa de gel é tratada com corantes capazes de evidenciar o DNA. Um dos mais utilizados é o brometo de etídio, substância que se insere entre as bases nitrogenadas dos ácidos nucleicos e fluoresce quando submetido à luz ultravioleta. Sob esse tipo de iluminação, aparecem nitidamente as faixas formadas pelos fragmentos de DNA de diferentes tamanhos, que revelam o resultado da corrida eletroforética.

Fotografias do gel sob luz ultravioleta permitem aos pesquisadores registrar a posição e a espessura de cada faixa. O padrão eletroforético de um DNA lembra um código de barras utilizado no comércio para armazenar informações sobre um produto. É possível calcular o tamanho dos fragmentos do DNA originados pela digestão com a endonuclease de restrição, comparando-os aos fragmentos de tamanhos conhecidos que percorreram o mesmo gel (chamados marcadores de peso molecular). (Fig. 4.7)

A combinação das técnicas de corte por endonucleases e de eletroforese permite identificar, com altíssimo grau de precisão, o DNA de cada pessoa, procedimento que alterou a criminalística e teve grande impacto no sistema judiciário.

Explicar as diferentes técnicas de biotecnologia aos estudantes pode ser um desafio, pois a rotina de um laboratório é uma realidade distante da de um aluno. Pode ser interessante buscar vídeos na internet que mostrem como a técnica é realizada ou, então, adaptar a técnica para que ela possa ser realizada com os estudantes em sala de aula. Sugestões de endereços eletrônicos que apresentam a técnica adaptada de eletroforese e outras técnicas de biotecnologia encontram-se no **Suplemento para o Professor**.


Placa de gel na qual se realiza a "corrida" entre fragmentos de DNA de cada amostra
CHEGADA
SAÍDA
polo (+)
polo (−)
Fragmentos menores
Fragmentos intermediários
Fragmentos maiores
Fenda no gel que recebe a mistura de fragmentos de DNA de uma amostra

ADILSON SECCO

Figura 4.7 Representação esquemática da técnica de eletroforese, que permite separar fragmentos de DNA cortados por uma endonuclease de restrição. Cada tipo de DNA analisado produz um padrão de bandas característico. Quanto mais espessa a banda, maior a quantidade de DNA que ela contém. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Ciência e cidadania

Por ser um tema divulgado na mídia e desenvolvido em filmes, seriados e outros programas de entretenimento, os estudantes demonstram, em geral, grande interesse em compreender os processos de identificação de pessoas pelo DNA. Depois da discussão deste quadro, aproveite para propor a realização (individual, em grupo, em sala ou fora do horário de aula) da atividade do *Faça você mesmo!*, em que, com base na análise de segmentos de DNA de cinco pessoas, deve-se determinar, em um caso, qual delas é suspeita de um crime e, em outro, o suposto pai de uma criança.

A identificação de pessoas pelo DNA

1 É possível identificar o DNA de uma pessoa por meio de uma técnica que consiste em picotar as moléculas do ácido nucleico com enzimas de restrição e depois identificar o padrão de fragmentos originados por meio de eletroforese em gel. A análise do padrão de bandas obtidos na eletroforese revelou-se um método seguro de identificação de pessoas e hoje é amplamente utilizado em investigações policiais e em processos judiciais.

2 O princípio da metodologia é o seguinte: como as pessoas diferem entre si quanto ao material genético que possuem (exceto nos gêmeos univitelínicos), a "digestão", isto é, a fragmentação do DNA de uma pessoa por uma enzima de restrição, produzirá um padrão de fragmentos típico apenas dela, comparável a um "código de barras" ou a uma "impressão digital" molecular.

Detecção de fragmentos específicos de DNA

3 Ao cortar o DNA do genoma de um organismo eucariótico com uma enzima de restrição, são produzidos tantos fragmentos, de tantos tamanhos diferentes, que seria impossível visualizar todas as bandas individuais no gel de eletroforese. Por isso, é preciso evidenciar apenas determinados tipos de fragmentos de DNA que realmente interessem na identificação.

4 Uma das técnicas consiste em realizar a eletroforese e então tratar o gel com uma substância que abre as cadeias duplas dos fragmentos de DNA. Em seguida, coloca-se sobre o gel uma membrana especial, para a qual esses fragmentos são transferidos na mesma posição em que estavam no gel. Aplica-se sobre essa membrana uma solução contendo sondas moleculares: pequenas moléculas de DNA de fita simples com algum tipo de marcação detectável – geralmente, radioatividade. O papel dessas sondas é parear suas sequências com fragmentos de DNA complementares presentes no gel, evidenciando apenas as bandas de interesse.

Sequências de DNA utilizadas na identificação de pessoas

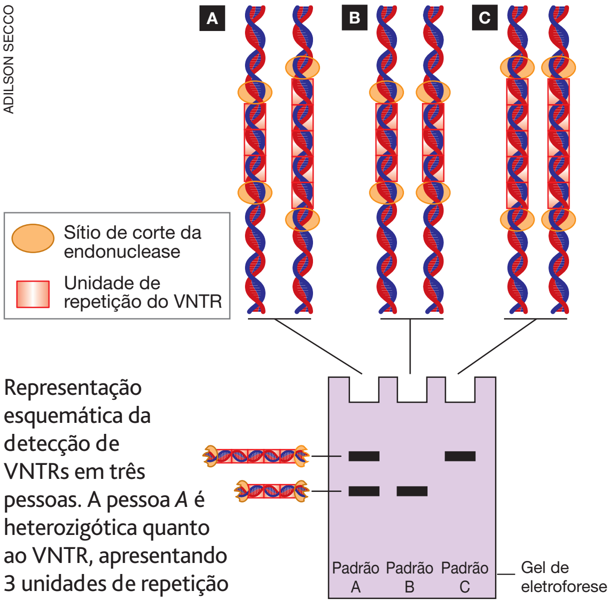
5 Geralmente, os testes de identificação por DNA empregam sondas capazes de detectar regiões não codificantes do genoma humano que variam muito de uma pessoa para outra. Essas regiões, conhecidas pela sigla **VNTR** (*variable **n**umber of **t**andem **r**epeats*: "número variável de repetições em sequência", em inglês), são constituídas por sequências curtas, de até algumas dezenas de nucleotídios, que se repetem ao longo de trechos da molécula de DNA. O número dessas repetições varia entre as pessoas, daí o nome.

6 Por exemplo, suponha que uma pessoa apresente, em determinada região de um cromossomo, um trecho VNTR com cinco repetições e, na região correspondente do cromossomo homólogo, um trecho com apenas três repetições. O tratamento do DNA dessa pessoa com determinada enzima de restrição produzirá dois tipos de fragmentos nessa região: alguns com três repetições, e outros, maiores, com cinco repetições. Muitos outros fragmentos de diversos tamanhos serão produzidos na digestão desse DNA, pois as sequências-alvo de uma enzima de restrição estão, em geral, dispersas por todo o genoma. No entanto, uma sonda que identifique as VNTRs em estudo revelará, após a separação por eletroforese, apenas duas bandas: uma correspondente aos fragmentos com três repetições da VNTR e outra, aos fragmentos com cinco repetições.

7 Usando-se a mesma sonda, o DNA de outra pessoa que tenha três repetições desse trecho VNTR no mesmo par de cromossomos homólogos produzirá apenas uma banda na eletroforese.

8 Uma terceira pessoa, com cinco repetições em cada um dos cromossomos do par, também apresentará uma única banda, que estará em uma posição diferente no gel.

ADILSON SECCO



Representação esquemática da detecção de VNTRs em três pessoas. A pessoa *A* é heterozigótica quanto ao VNTR, apresentando 3 unidades de repetição em um dos cromossomos e 5 unidades no cromossomo homólogo. A pessoa *B* é homozigótica, apresentando 3 unidades de repetição em ambos os homólogos. A pessoa *C* também é homozigótica, mas apresenta 5 unidades de repetição em cada um dos homólogos. Na parte inferior do desenho, resultado da separação eletroforética dos fragmentos de DNA das três pessoas, gerados pelo corte com uma endonuclease de restrição que corta o DNA nos limites dessas VNTRs.

Determinação de paternidade pela análise do DNA

9 O teste de paternidade foi um dos principais fatores de popularização da sigla DNA, mas hoje se questiona se esse tipo de exame deve ser realizado livremente pelas pessoas. Em alguns países, proíbe-se a realização de tais exames sem solicitação explícita da Justiça, com a argumentação de que os danos psicológicos que os resultados eventualmente podem causar superam, em muitos casos, os benefícios.

10 Com base na estimativa da frequência de cada tipo de VNTR na população e do número de VNTRs utilizado no diagnóstico, pode-se estimar o grau de confiabilidade do teste de DNA em mais de 99,9%.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

Neste quadro, apresentamos os princípios da técnica utilizada para identificar pessoas pelo DNA, hoje amplamente aplicada pela Justiça. Este guia vai ajudá-lo a analisar o quadro em profundidade.

1 Leia o primeiro parágrafo do quadro. Certifique-se de que realmente entendeu os princípios da técnica. Confira, neste capítulo, o modo de ação das enzimas de restrição (o que elas fazem?) e os princípios da técnica de eletroforese.

2 No segundo parágrafo, é afirmado que o corte com enzimas de restrição permite identificar o DNA de diferentes pessoas, exceto o de gêmeos univitelínicos. Por que isso ocorre?

3 Ainda no segundo parágrafo, o trecho faz alusão ao padrão de bandas de uma eletroforese de fragmentos de DNA e um código de barras. Você já pensou em pesquisar os princípios usados nos códigos de barras? Considere esse tema para futuras pesquisas.

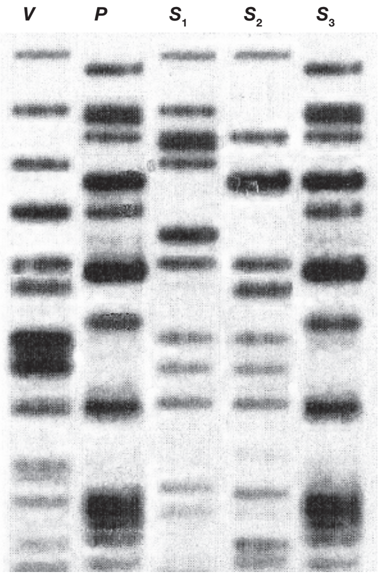
4 Leia os parágrafos de números 3 e 4, que tratam das sondas moleculares. Qual seria a imagem formada no gel caso as sondas se ligassem a qualquer trecho de DNA, em vez de serem específicas?

5 Leia atentamente os parágrafos de 5 a 8, analisando também o esquema que ilustra o texto. Certifique-se de ter entendido a correlação entre os trechos do DNA analisado e as bandas da eletroforese. Em caso de dúvida, volte ao capítulo. Escreva um resumo desse trecho do texto.

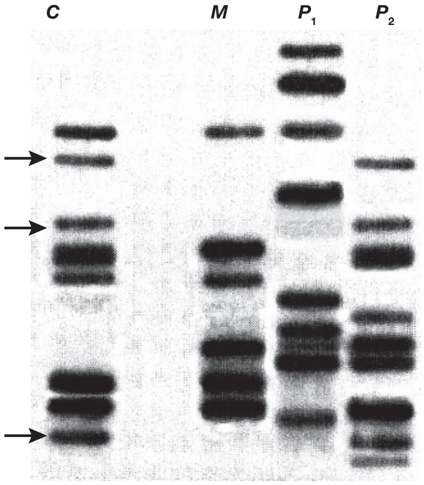
6 A fotografia **A**, acima, mostra os padrões de bandas obtidos na eletroforese de amostras de DNA: a) da vítima de um crime (*V*): b) de uma gota de sangue encontrada no local do crime e classificada como prova (*P*); c) de três suspeitos de terem cometido o crime (S_1, S_2 e S_3). Qual padrão dos suspeitos mais se aproxima da prova?

7 No parágrafo 9, comenta-se a possibilidade de proibição dos testes de DNA por particulares, a menos que a Justiça permita. O que você acha disso? Será que o Estado tem o direito de impedir as pessoas de realizar investigações sobre seu próprio material genético e o de seus familiares? Pesquise a respeito e escreva um pequeno texto dissertativo sobre o assunto.

8 A fotografia **B**, ao lado, mostra o resultado de um teste de DNA de uma mulher (*M*), mãe de uma criança (*C*), cuja paternidade é disputada por dois homens (P_1 e P_2). Amostras de DNA dos quatro envolvidos foram tratadas com uma mesma enzima de restrição, submetidas à eletroforese na mesma placa de gel e tratadas com determinada sonda de DNA para revelar certos tipos de VNTRs. Qual dos dois homens tem mais probabilidade de ser o pai da criança? Justifique.



Fotografia A: Padrões de VNTRs de quatro pessoas envolvidas em uma investigação policial e de uma prova encontrada no local do crime: vítima (*V*); prova (*P*); suspeitos (S_1, S_2 e S_3).



Fotografia B: Padrões de VNTRs de quatro pessoas envolvidas em um teste de paternidade: criança (*C*); mãe da criança (*M*); possíveis pais (P_1 e P_2). Note que alguns fragmentos de DNA da criança (assinalados com as setas à esquerda) não estão presentes no DNA de sua mãe e, portanto, só podem ter sido herdados do pai.

FOTOS: REPRODUÇÃO

4.4 Clonagem do DNA

Plasmídios como vetores de clonagem de DNA

Plasmídios são moléculas circulares de DNA, menores que o cromossomo bacteriano e cuja presença não é essencial à vida da bactéria. Possuir plasmídios, no entanto, por vezes é vantajoso para a bactéria, pois essas pequenas moléculas de DNA podem conter genes responsáveis pela destruição de substâncias tóxicas como antibióticos.

Os plasmídios, presentes em uma ou mais cópias na bactéria, têm capacidade de se multiplicar independentemente do cromossomo bacteriano e são transmitidos às bactérias-filhas por ocasião da divisão celular.

No início da década de 1970, os pesquisadores estadunidenses Stanley Norman Cohen (1935-) e Herbert Boyer (1936-) cortaram plasmídios de uma bactéria em um ponto específico e emendaram nesse DNA plasmidial um segmento de DNA de outro organismo. O corte foi realizado com endonucleases de restrição e as “emendas”, com enzimas bacterianas denominadas ligases.

O resultado dessa engenharia molecular foi um **plasmídio recombinante**, ou seja, o DNA do plasmídio unido a um DNA de outra procedência. O plasmídio recombinante foi então incorporado por bactérias vivas, procedimento conhecido como transformação bacteriana, o que possibilitou testar sua capacidade de se multiplicar em células vivas. As bactérias transformadas multiplicaram-se normalmente, originando cópias idênticas.

As experiências mostraram que o plasmídio recombinante multiplica-se normalmente na bactéria que o incorpora, transmitindo-se às bactérias-filhas. Assim, a partir de uma única célula bacteriana “transformada” pelo plasmídio recombinante, pode-se obter clones constituídos por bilhões de bactérias idênticas, cada uma com uma ou mais cópias do DNA recombinante incorporado.

Moléculas de um DNA recombinante obtidas na multiplicação bacteriana constituem um “clone” molecular e, por isso, a metodologia para multiplicar DNA dessa maneira é denominada **clonagem molecular**. (Fig. 4.8)

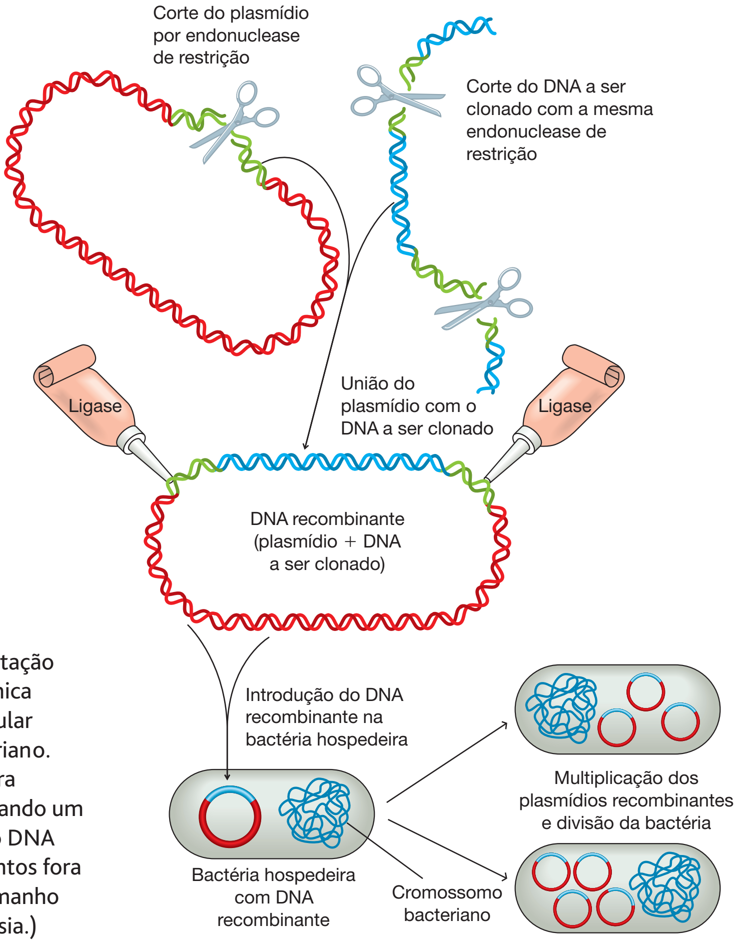

Corte do plasmídio por endonuclease de restrição
Corte do DNA a ser clonado com a mesma endonuclease de restrição
Ligase
União do plasmídio com o DNA a ser clonado
Ligase
DNA recombinante (plasmídio + DNA a ser clonado)
Introdução do DNA recombinante na bactéria hospedeira
Multiplicação dos plasmídios recombinantes e divisão da bactéria
Bactéria hospedeira com DNA recombinante
Cromossomo bacteriano

Figura 4.8 Representação esquemática da técnica de clonagem molecular em plasmídio bacteriano. A bactéria hospedeira multiplica-se, originando um clone com cópias do DNA introduzido. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Bacteriófagos como vetores de clonagem de DNA

A clonagem de DNA pode ser feita também por meio de vírus que se multiplicam em bactérias, os **bacteriófagos** (fagos). Um fago apresenta um envoltório de proteína constituído por duas peças principais, a “cabeça” e a “cauda”. No interior da cabeça encontra-se compactada uma longa molécula de DNA de cadeia dupla, o cromossomo do fago.

Ao encontrar uma bactéria que lhe sirva de hospedeiro, o fago adere à parede bacteriana por meio de ligantes presentes em sua cauda. Em seguida, perfura a parede da bactéria e injeta nela seu DNA; a cabeça e a cauda do fago não penetram na célula. No interior da célula bacteriana, o DNA do fago inicia sua multiplicação, produzindo dezenas de cópias idênticas ao DNA original. Ao mesmo tempo, o DNA viral comanda a síntese das proteínas virais. Após algum tempo, em certos casos não mais que 20 minutos, a bactéria infectada arrebenta, liberando dezenas de novos fagos.

O vírus mais utilizado como **vetor de clonagem** molecular é o fago lambda, um dos bacteriófagos mais bem conhecidos do ponto de vista genético. Todos os genes desse fago estão mapeados em seu cromossomo e se conhece a sequência exata em que cada um deles entra em atividade, após a introdução do DNA viral na bactéria hospedeira.

O fago lambda tem genes essenciais, indispensáveis à sua multiplicação, e genes não essenciais, cuja presença é dispensável à reprodução viral. Os genes essenciais, localizados nas pontas do cromossomo do vírus, são responsáveis pela produção das proteínas do envoltório viral, das enzimas que atuam na duplicação do DNA viral, das enzimas de empacotamento do DNA e de algumas outras proteínas importantes. Os genes não essenciais localizam-se na região mediana do cromossomo viral e estão envolvidos em processos de recombinação entre moléculas de DNA, não interferindo na multiplicação do vírus.

Esse conhecimento possibilitou o uso desse vírus como vetor de clonagem molecular. Nesse caso, a região mediana do cromossomo viral, na qual se localizam os genes não essenciais, é removida e substituída por um segmento de DNA de qualquer outro organismo. O DNA recombinante formado é encapsulado por proteínas virais, originando uma partícula viral capaz de infectar e se multiplicar em bactérias hospedeiras. Assim, a partir de uma única partícula viral, é possível obter bilhões de partículas idênticas, cada uma delas contendo uma cópia do fragmento de DNA que foi introduzido no cromossomo do vírus. (Fig. 4.9)

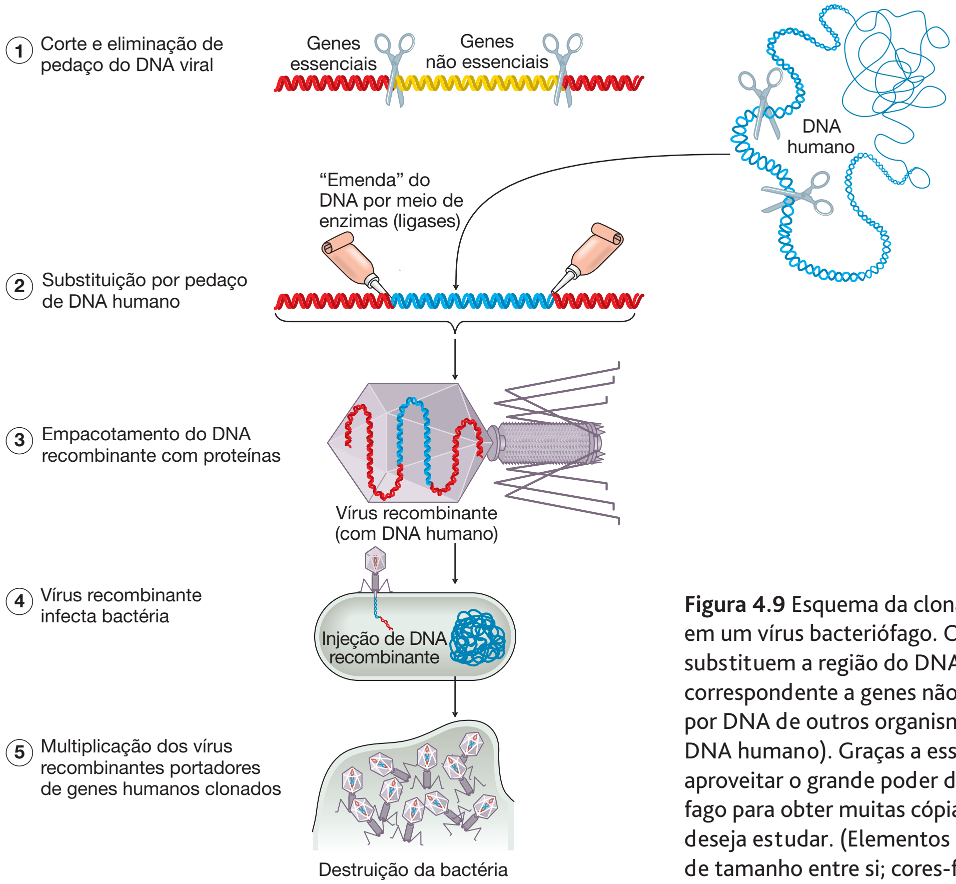

1 Corte e eliminação de pedaço do DNA viral
Genes essenciais
Genes não essenciais
DNA humano
“Emenda” do DNA por meio de enzimas (ligases)
2 Substituição por pedaço de DNA humano
3 Empacotamento do DNA recombinante com proteínas
Vírus recombinante (com DNA humano)
4 Vírus recombinante infecta bactéria
Injeção de DNA recombinante
5 Multiplicação dos vírus recombinantes portadores de genes humanos clonados
Destruição da bactéria

Figura 4.9 Esquema da clonagem molecular em um vírus bacteriófago. Os cientistas substituem a região do DNA viral correspondente a genes não essenciais por DNA de outros organismos (no esquema, DNA humano). Graças a esse artifício, pode-se aproveitar o grande poder de multiplicação do fago para obter muitas cópias do DNA que se deseja estudar. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Bactérias como “fábricas” de proteínas humanas

Com o desenvolvimento da clonagem molecular, tornou-se possível isolar genes codificadores de proteínas humanas, ligá-los a plasmídios bacterianos e introduzi-los em bactérias, transformando esses microrganismos em verdadeiras “fábricas” de proteínas: estas são genuinamente humanas quanto à sequência de aminoácidos, porém foram sintetizadas pelo metabolismo bacteriano.

Em 1977, a primeira empresa de biotecnologia (Genentech), criada por Herbert Boyer e pelo empresário Robert Swanson (1947-1999), conseguiu produzir o hormônio humano somatostatina em bactérias. Esse hormônio, um oligopeptídio com 14 aminoácidos, desempenha diversas funções em nosso corpo, como modular a produção de hormônios pancreáticos, inibir a produção de certos hormônios pela hipófise, atuar como anti-hemorrágico etc., despertando, portanto, grande interesse farmacêutico. Nesse experimento pioneiro, um segmento de DNA formado por 60 pares de nucleotídios, com a codificação para os 14 aminoácidos constituintes da somatostatina, foi unido a um plasmídio e introduzido em bactérias. A partir delas, foram obtidos clones bacterianos que produziam o hormônio.

No ano seguinte, foi clonado o gene codificador da insulina humana, hormônio cuja deficiência no organismo está associada ao diabetes melito. Essa foi a segunda proteína humana a ser produzida em bactérias e teve sua comercialização para uso terapêutico aprovada em 1982. Até então, o tratamento de diabéticos era feito com hormônio extraído de pâncreas de bois e porcos obtidos em matadouros. Apesar de a insulina desses animais ser muito semelhante à humana, ela pode desencadear problemas alérgicos. Por outro lado, a insulina produzida em bactérias transformadas é idêntica à humana e não provoca alergia, tendo substituído quase completamente a insulina de origem não humana. Hoje, diversas proteínas humanas comercializadas como medicamentos são produzidas a partir de clones bacterianos. (Fig. 4.10)

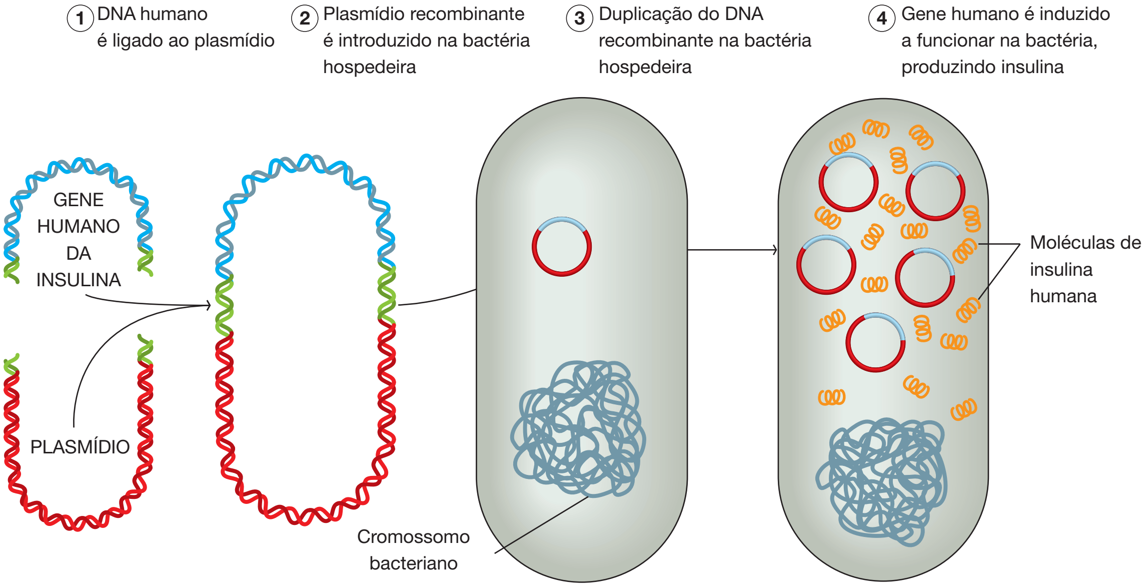

① DNA humano é ligado ao plasmídio
② Plasmídio recombinante é introduzido na bactéria hospedeira
③ Duplicação do DNA recombinante na bactéria hospedeira
④ Gene humano é induzido a funcionar na bactéria, produzindo insulina
GENE HUMANO DA INSULINA
PLASMÍDIO
Cromossomo bacteriano
Moléculas de insulina humana

Figura 4.10 Representação esquemática da clonagem do gene da insulina humana. Segmentos de DNA que codificam a produção da insulina humana são ligados a moléculas de DNA de plasmídios e introduzidos em bactérias, de modo que estas passam a produzir moléculas de insulina humana. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

4.5 Misturando genes entre espécies: transgênicos

Organismos portadores de DNA de outra espécie, como as bactérias utilizadas na produção de proteínas humanas medicamentosas, são chamados **transgênicos**, pois foram gerados pela transferência de material genético de outra espécie ou **transgenia**.

As técnicas de manipulação do DNA possibilitaram a transferência de genes também entre organismos eucarióticos, como animais e plantas. Os geneticistas têm produzido transgênicos de interesse. Nesse contexto popularizou-se a expressão **organismo geneticamente modificado (OGM)** como sinônimo de transgênico.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Os transgênicos são hoje indispensáveis em diversos estudos acadêmicos que visam compreender melhor a estrutura e o funcionamento dos seres vivos. Eles têm sido também uma importante ferramenta na área de melhoramento genético, permitindo a geração de novas linhagens de animais e de plantas potencialmente mais lucrativas, como soja resistente a herbicidas e milho e algodão resistentes a pragas.

Como são produzidos animais transgênicos?

O primeiro “transplante” bem-sucedido de genes entre animais foi realizado em 1981. Fragmentos de DNA de coelho, contendo um gene para a hemoglobina, foram injetados em células-ovo de camundongo.

Alguns dos camundongos originados desses zigotos tinham hemoglobina de coelho em suas hemácias. Portanto, o DNA injetado no ovo incorporou-se a um cromossomo e foi transmitido de uma geração de células para outra durante as mitoses ocorridas no desenvolvimento do animal. Quando os camundongos transgênicos foram cruzados, o gene de coelho incorporado ao seu genoma foi transmitido de geração em geração, segundo as leis básicas da herança genética.

Na produção de transgênicos de mamíferos geralmente são utilizadas células-ovo geradas por fecundação *in vitro*, processo em que óvulos retirados das fêmeas são colocados em um líquido apropriado contendo espermatozoides. O processo da fecundação é acompanhado ao microscópio e segmentos do DNA que se deseja incorporar são injetados na célula-ovo recém-formada. A microinjeção é feita com uma finíssima agulha de vidro acoplada a uma aparelhagem de micromanipulação. Os embriões originados são implantados no útero de fêmeas, no qual se desenvolvem.

Em geral, uma ou mais moléculas do DNA injetado incorporam-se aos cromossomos da célula-ovo e são transmitidas às células-filhas, quando o zigoto se divide; assim, todas as células do indivíduo conterão o DNA transplantado. Quando o organismo transgênico se reproduzir, os genes incorporados serão transmitidos à descendência como qualquer outro gene. (Fig. 4.11)

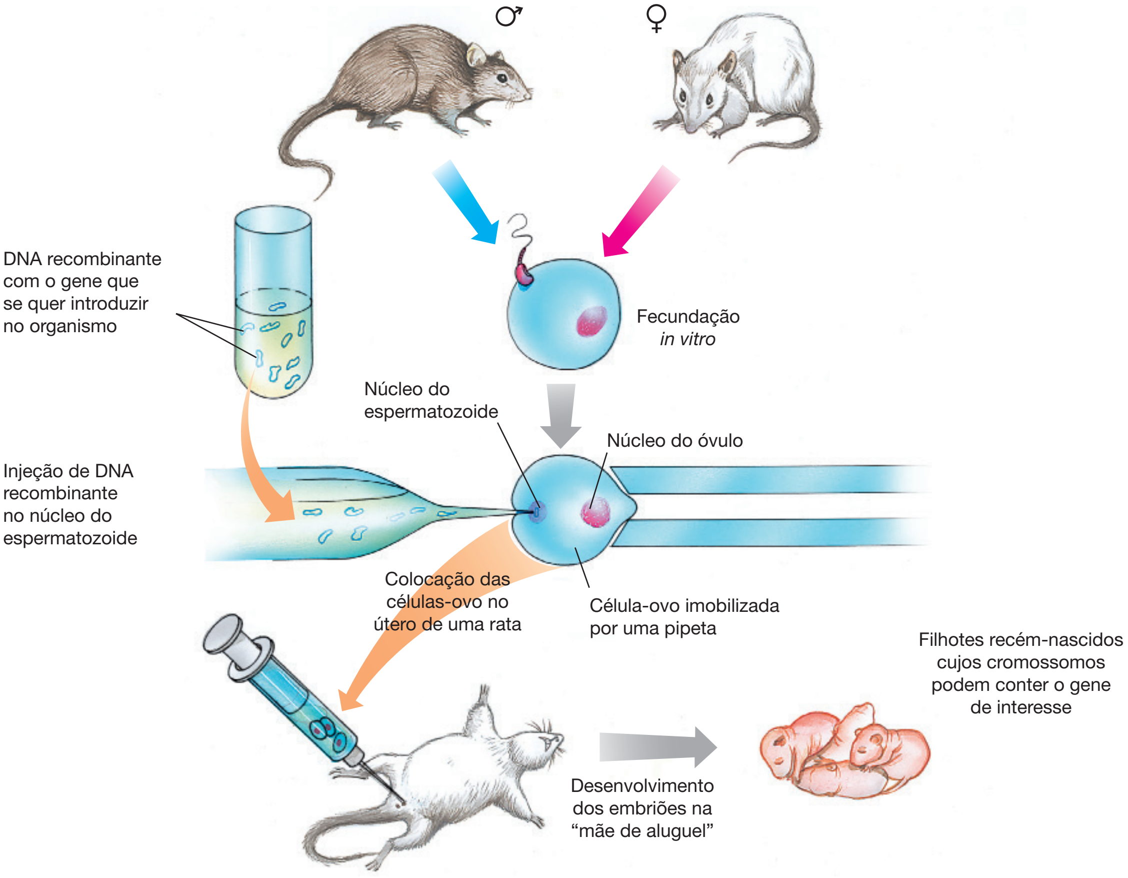

♂
♀
DNA recombinante com o gene que se quer introduzir no organismo
Fecundação *in vitro*
Núcleo do espermatozoide
Núcleo do óvulo
Injeção de DNA recombinante no núcleo do espermatozoide
Colocação das células-ovo no útero de uma rata
Célula-ovo imobilizada por uma pipeta
Filhotes recém-nascidos cujos cromossomos podem conter o gene de interesse
Desenvolvimento dos embriões na “mãe de aluguel”

Figura 4.11 Representação esquemática das etapas de produção de ratos transgênicos. O DNA geralmente é injetado no núcleo originado do espermatozoide (pronúcleo masculino) antes de sua fusão com o núcleo do óvulo (pronúcleo feminino). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

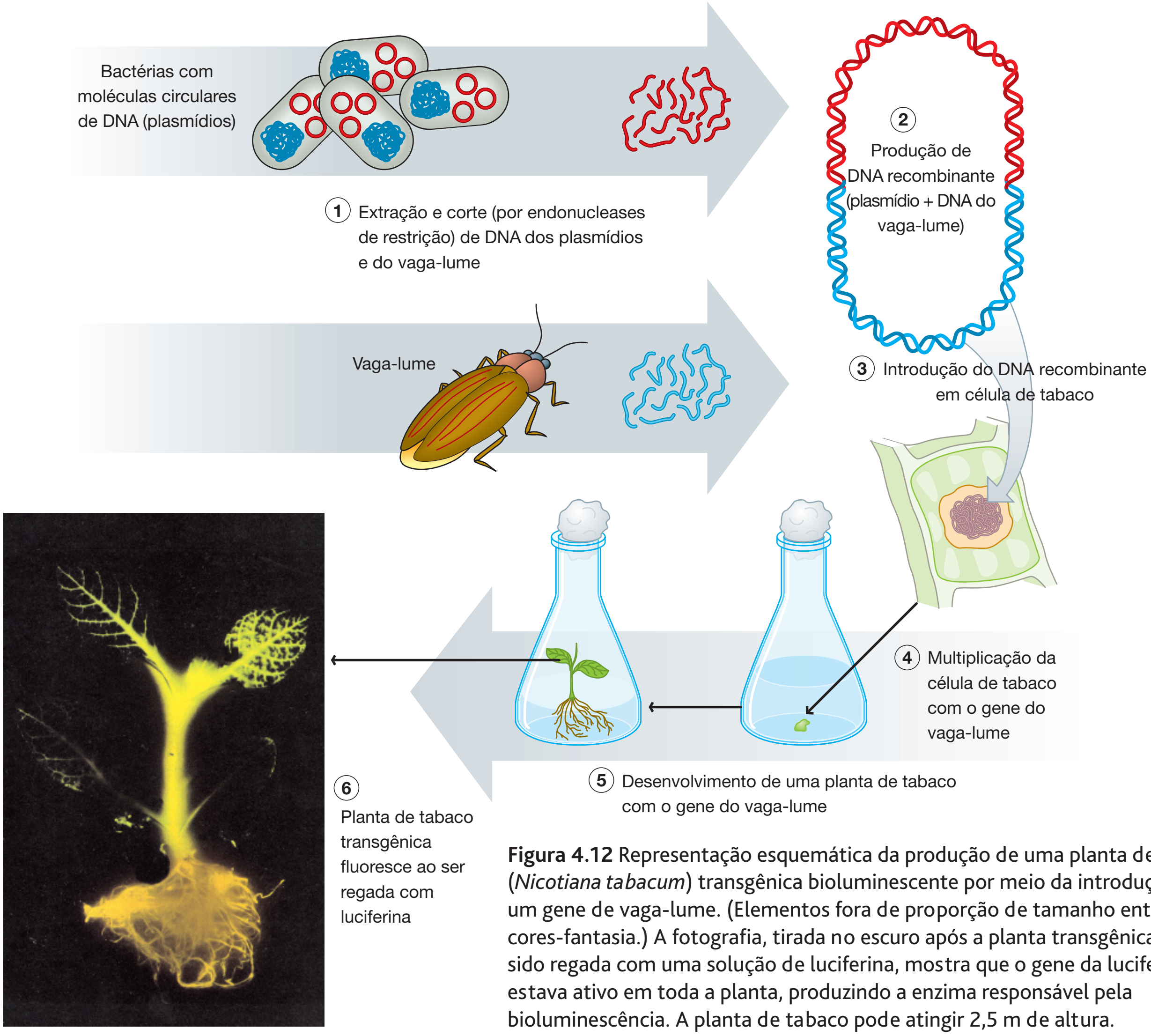
Transgênicos entre animais e plantas

A manipulação genética de plantas é relativamente mais fácil que a de animais, pois é possível obter uma planta completa a partir de uma única célula vegetal geneticamente transformada. O plasmídio da bactéria *Agrobacterium tumefaciens*, capaz de se integrar com facilidade a cromossomos de plantas, tem sido muito utilizado como vetor de clonagem.

Outra técnica empregada para a introdução de DNA estranho em células vegetais é a biobalística, que consiste no bombardeamento de células de uma planta com micropartículas de tungstênio recobertas de DNA contendo o gene de interesse. As micropartículas penetram na célula vegetal, na qual o DNA se libera e migra para o núcleo celular, incorporando-se aos cromossomos. Pela ação de hormônios, as células vegetais são então induzidas a se multiplicar e a originar novas plantas; as que incorporaram o DNA estranho produzem plantas transgênicas.

Um exemplo emblemático de transgenia em vegetais foi a introdução de um gene de vaga-lume em uma planta de tabaco. O gene inserido na planta tinha informação para a síntese da luciferase, enzima que catalisa a reação química produtora de luz (bioluminescência), que os vaga-lumes utilizam para atrair parceiros na fase de acasalamento.

O gene da luciferase do vaga-lume foi introduzido em um plasmídio e clonado em bactérias. Desse modo, obteve-se grande quantidade de cópias do gene, que, depois de purificado, foi injetado em células da planta do tabaco. Com a técnica de cultura de tecidos vegetais, bem conhecida dos botânicos, obteve-se uma planta completa a partir de uma única célula transformada. O gene da luciferase do vaga-lume havia se incorporado a um dos cromossomos da planta e foi transmitido a todas as suas células. Ao ser regada com luciferina, substância sobre a qual age a luciferase, a planta de tabaco transgênico passou a emitir uma tênue luz esverdeada. (Fig. 4.12)


Bactérias com moléculas circulares de DNA (plasmídios)
① Extração e corte (por endonucleases de restrição) de DNA dos plasmídios e do vaga-lume
② Produção de DNA recombinante (plasmídio + DNA do vaga-lume)
Vaga-lume
③ Introdução do DNA recombinante em célula de tabaco
④ Multiplicação da célula de tabaco com o gene do vaga-lume
⑤ Desenvolvimento de uma planta de tabaco com o gene do vaga-lume
⑥ Planta de tabaco transgênica fluoresce ao ser regada com luciferina

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

DONALD R. HELINSKI/UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA, SAN DIEGO

Figura 4.12 Representação esquemática da produção de uma planta de tabaco (*Nicotiana tabacum*) transgênica bioluminescente por meio da introdução de um gene de vaga-lume. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) A fotografia, tirada no escuro após a planta transgênica ter sido regada com uma solução de luciferina, mostra que o gene da luciferase estava ativo em toda a planta, produzindo a enzima responsável pela bioluminescência. A planta de tabaco pode atingir 2,5 m de altura.

Nos últimos anos, transgênicos de plantas tornaram-se amplamente conhecidos por grande parte da população, principalmente em virtude das polêmicas sobre o plantio de certa variedade transgênica de soja. Essas plantas receberam um gene bacteriano que confere resistência a determinadas substâncias herbicidas, utilizadas para matar ervas daninhas que crescem nos campos de cultivo. Com isso, os agricultores podem empregar herbicidas que eliminam todas as outras plantas, menos a soja transgênica, o que diminui o trabalho de limpeza do campo de cultivo; além disso, sem as plantas competidoras, a produtividade da lavoura de soja aumenta.

Outro transgênico muito comercializado atualmente é uma variedade de milho – o milho Bt – que tem incorporado em seu genoma um gene da bactéria *Bacillus thuringiensis*, utilizada na agricultura como pesticida biológico. Com a incorporação desse gene, as células do milho passam a produzir uma substância tóxica para os insetos, porém inofensiva para os vertebrados. O cultivo dessa variedade de milho permite uma drástica redução no uso de defensivos agrícolas para o combate de insetos-praga.

A comercialização de derivados de organismos transgênicos só é liberada após inúmeros testes para comprovar sua segurança tanto no que se refere à saúde das pessoas e dos animais consumidores quanto ao meio ambiente. No Brasil, as atividades e os projetos que envolvem OGM e seus derivados são regulados pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), criada pela Lei n. 11.105, de 24 de março de 2005.

A CTNBio já aprovou o plantio comercial de diversas plantas transgênicas, entre elas a soja, o milho e o algodão, cujas áreas cultivadas aumentam ano a ano. Em 2011, 80% da soja produzida no Brasil era transgênica. Nesse ano, alcançamos o segundo lugar no cultivo de plantas transgênicas no *ranking* mundial dos 29 países produtores, ficando atrás apenas dos Estados Unidos.

Ao abordar as polêmicas sobre o cultivo de variedades de plantas transgênicas no Brasil, proponha a realização da atividade 8 do *Questões para exercitar o pensamento*. Para isso, seria interessante pedir aos estudantes que pesquisem ou disponibilizar textos com opiniões de diversos cientistas contra e a favor do uso de organismos geneticamente modificados. Ao final dessa atividade, os estudantes conseguirão adquirir um repertório de conhecimentos que permitirá a formação de sua própria opinião sobre o plantio e o consumo de alimentos transgênicos.

4.6 Desvendando o genoma humano

Como vimos, atualmente contamos com metodologias que permitem cortar moléculas de DNA em pedaços definidos e separá-los uns dos outros. Sabemos como induzir a multiplicação dos fragmentos isolados para obter uma infinidade de cópias de cada um deles. Descobrimos como unir pedaços de DNA de origens diferentes, produzindo moléculas-quimeras. Estas podem ser inseridas em células vivas, modificando seu funcionamento e sendo transmitidas para as gerações futuras.

As tecnologias de manipulação do DNA projetam a possibilidade de, no futuro, recorrer à chamada **geneterapia** para tratar e curar doenças hereditárias humanas. Assim, genes normais poderão ser produzidos em laboratório e injetados em células doentes, “transformando-as” em células sadias.

O desenvolvimento das pesquisas sobre DNA tornou possível o Projeto Genoma Humano, uma ambiciosa empreitada científica para conhecer e caracterizar todos os genes de nossa espécie, mapeando-os nos cromossomos e determinando seu modo de funcionamento. Um desafio gigantesco, tendo em vista que os primeiros resultados do projeto já revelaram que o sistema biológico é muito mais complexo do que se imaginava e que ainda será necessário muito estudo para compreender os fundamentos da vida.

Comente com os estudantes que a geneterapia (ou terapia genética) pode proporcionar benefícios a pacientes com doenças como alguns tipos de câncer e a aids. Sugira novas pesquisas sobre o tema.

O Projeto Genoma Humano

O **Projeto Genoma Humano** começou oficialmente em outubro de 1990, com a publicação de um plano de pesquisa cujo objetivo principal era determinar a sequência de todos os nucleotídios dos 24 tipos de cromossomos constituintes do genoma humano (os 22 autossomos e os cromossomos sexuais X e Y). Outro objetivo do projeto era a identificação de todos os genes humanos.

O projeto foi iniciado por duas agências governamentais estadunidenses, o Departamento de Energia e o Instituto Nacional de Saúde (em inglês, NIH), com a participação de universidades e institutos de pesquisa de diversos países.

Em maio de 1998, uma empresa privada estadunidense entrou na disputa pela pesquisa sobre o sequenciamento do genoma humano, prometendo completá-lo em apenas três anos, quatro anos antes do previsto pelo consórcio público. A principal diferença entre os dois projetos era o método empregado para a determinação das sequências de nucleotídios.

A estratégia do consórcio público era dividir cada cromossomo em grandes fragmentos e determinar a sequência de nucleotídios de fragmentos adjacentes. A empresa privada adotou a estratégia de partir todo o genoma em pequenos fragmentos, sequenciar cada um deles e, em seguida, ordená-los pela sobreposição de suas extremidades, o que demandou o uso de potentes computadores e sofisticados programas de computação. Outra diferença é que a empresa privada não pretendia tornar públicos os dados obtidos, e sim patenteá-los e comercializá-los.

Diante da possibilidade de uma corporação particular tornar-se proprietária exclusiva de um patrimônio da humanidade (o genoma humano), o consórcio público redobrou os esforços para concluir o projeto em menor tempo.

Finalmente, em 26 de junho de 2000, os pesquisadores Francis Collins (1950-) (líder do consórcio público) e Craig Venter (1946-) (presidente da empresa privada) anunciaram a conclusão de um esboço geral do genoma humano. Os trabalhos foram publicados em fevereiro de 2001 nas revistas científicas *Science* (a parte realizada pela corporação particular) e *Nature* (a parte realizada pelo consórcio público). O projeto foi considerado concluído em 2003, mas as análises dos dados obtidos têm continuado e seguirão por muitos anos.

Graças ao projeto, sabemos que o genoma humano é constituído por 3 bilhões e 164,7 milhões de pares de nucleotídios. Para ter ideia do que isso representa, se escrevêssemos em caracteres bem pequenos a sequência de iniciais das bases (A, T, C e G) de uma das cadeias de DNA dos 24 tipos de cromossomos humanos, preencheríamos mais de 200 volumes equivalentes a grossas listas telefônicas. Quase toda a sequência de bases do genoma humano, 99,9%, é exatamente a mesma em todas as pessoas, portanto não mais do que 0,1% é responsável por toda a variabilidade genética de nossa espécie.

Dos cerca de 3 bilhões de pares de bases do genoma humano, apenas 2% correspondem a genes; cerca de 98% são sequências não codificantes, isto é, que não são transcritas para moléculas de RNA. O número total de genes humanos, estimado entre 20 mil e 25 mil, é bem menor do que os cerca de 100 mil previstos antes do sequenciamento do genoma humano. O tamanho médio de um gene humano é de 3 mil pares de bases, sendo que o maior gene humano, que codifica a proteína distrofina, tem 2,4 milhões de pares de bases.

No quesito número de genes, estamos em pé de igualdade com os camundongos e pouco acima das moscas, cujo genoma possui cerca de 13 mil genes. Não devemos esquecer, porém, que são as proteínas que desempenham a maioria das funções celulares e definem sua estrutura.

As pesquisas têm revelado que possuímos mais tipos de proteína do que de genes. Uma das razões é que um gene humano, assim como os de outros organismos eucarióticos, pode gerar mais de um tipo de RNA mensageiro, dependendo de como o RNA transcrito é cortado e emendado antes de sair do núcleo para o citoplasma, no qual será traduzido em proteína (relembre o *splicing* alternativo, visto no item 4.1).

Em 2012, um consórcio mundial de cientistas descobriu que grande parte do DNA não codificante humano (aproximadamente 80% do genoma) exerce função de regulação da síntese de proteínas, por meio de mecanismos ainda não compreendidos completamente. Muitas dessas sequências de nucleotídios, que se pensava não terem função alguma, atuam como "interruptores" nos circuitos genéticos, controlando a ativação ou desativação de genes. Esses segmentos de DNA podem também influenciar o *splicing* alternativo ou mesmo atuar uns sobre os outros, potencializando ou inibindo sua ação. (Fig. 4.13)

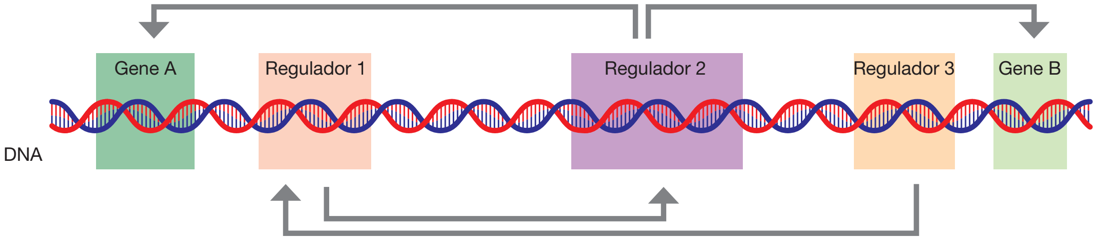


Figura 4.13 Representação esquemática da ação reguladora de regiões não codificantes do genoma. Os genes A e B são sequências de nucleotídios que codificam proteínas (DNA codificante); os reguladores são sequências que não codificam proteínas, mas interagem com os genes ou entre si, afetando a transcrição em outros locais do genoma. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÃO: ADILSON SECCO

Ciência e cidadania

Mais difícil do que o imaginado

1 "Em um [...] artigo publicado na revista *Nature* o diretor dos Institutos Nacionais de Saúde dos Estados Unidos, Francis Collins, recorda que, no anúncio da conclusão do sequenciamento do genoma humano, fez suas próprias previsões para 2010.

2 Ao lado do cientista-empresário Craig Venter – que encabeçava o consórcio privado para estudar o mesmo tema –, Collins apresentou ao então presidente Bill Clinton uma série de lâminas de PowerPoint na qual vaticinava: em uma década testes genéticos para apontar as chances de uma pessoa desenvolver uma ou mais doenças estarão disponíveis para uma dúzia de enfermidades e será possível reduzir o risco de desenvolver algumas delas com intervenções praticadas por médicos por meio da 'medicina genética'.

3 Collins foi além. Acrescentou que o diagnóstico pré-implantacional – análise genética do bebê ainda na fase de embrião, antes mesmo de implantá-lo no útero da mãe – estaria disponível em uma escala ampla, e seus limites éticos seriam ferozmente debatidos.

4 O cientista terminava suas previsões dizendo que em 2010 a proibição do preconceito genético – discriminação de uma pessoa por conta de alguma característica genética que ela tenha – seria uma realidade nos Estados Unidos e o acesso à medicina genética continuaria a ser desigual, especialmente nos países em desenvolvimento.

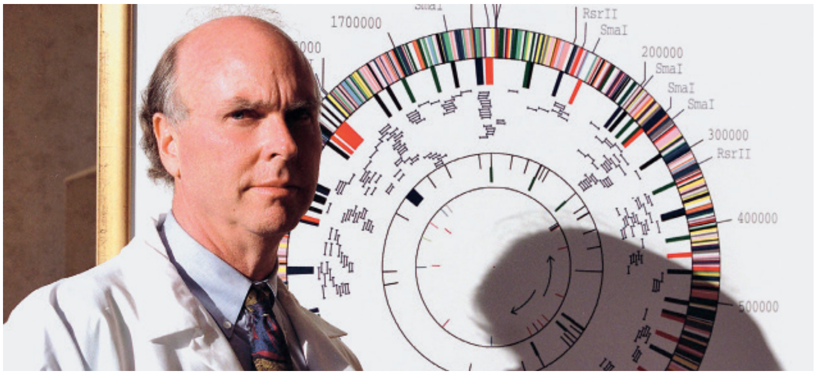
5 Como o próprio Collins afirma no artigo, é justo dizer que praticamente todos os itens das lâminas apresentadas na ocasião já são, com algumas ressalvas, realidade. Ainda assim, uma década depois de completa a primeira visão do genoma humano, a ciência avança de forma sôfrega e por vezes errática no desenvolvimento de medicamentos e tratamentos baseados no conhecimento adquirido sobre os genes.

Longe da maioria

6 Embora já se disponha de testes genéticos preditivos para muitas doenças raras, causadas por mutações em um único gene, ainda não existem exames comprovadamente eficazes para apontar com precisão as chances de desenvolvimento das enfermidades crônicas que mais limitam e matam no planeta: doenças cardiovasculares, cânceres, diabetes, Alzheimer e Parkinson. Isso porque, sabe-se hoje, são doenças causadas por alterações em mais de um gene – talvez centenas deles –, e os pesquisadores ainda não entenderam como se dá a interação entre o ambiente e essas sequências de DNA que dizem às células o que fazer.

7 Da mesma forma, a polêmica possibilidade de analisar e selecionar o embrião que seguirá adiante na fertilização *in vitro* ainda é uma realidade muito distante da maior parte da população – a segregação começa pelos altos preços cobrados para se fazer um bebê de proveta – e a discriminação genética, por enquanto, é apenas objeto de divagações. Uma sombra negra em um futuro que a maioria dos humanos, de forma imprudente, nem ousa vislumbrar.

8 Alguns avanços, entretanto, estão dando novo fôlego à esperança mundial de um planeta mais saudável – e limpo. No mês passado [maio de 2010], Craig Venter e sua turma anunciaram a criação de uma bactéria a partir de um genoma artificial. O ser que vive com um DNA totalmente montado em laboratório poderá, no futuro, dar origem a combustíveis alternativos ou a formas de vida orgânicas passíveis de serem programadas para realizar trabalhos impossíveis de serem feitos por seres humanos.



RUTH FREMSON/AP PHOTO/GLOW IMAGES

Craig Venter, geneticista estadunidense que ajudou a fundar a Celera Genomics, empresa privada que competiu com o consórcio público do Projeto Genoma Humano, fundou seu próprio instituto em 2002, cujo foco é a criação de genomas artificiais.

Reprogramação celular

9 Na Medicina, os avanços mais significativos estão concentrados em identificar genes que causam ou favorecem o surgimento de doenças. A partir desse conhecimento, já foi possível, por exemplo, silenciar a expressão de determinados genes com o intuito de tratar ou até mesmo evitar doenças.

10 Em março deste ano [2010], uma equipe do Instituto de Tecnologia da Califórnia, nos Estados Unidos, conseguiu silenciar genes específicos ligados ao melanoma, a forma mais agressiva e letal de câncer de pele, usando nanopartículas para 'entregar' no núcleo da célula sequências genéticas capazes de diminuir ou cessar completamente a expressão de um gene envolvido na doença. [...]

11 Outra área que vem recebendo grandes investimentos em pesquisa é a farmacogenômica, o estudo de como os medicamentos reagem em organismos com perfis genéticos diferentes. Hoje já existem testes capazes de prever como um indivíduo vai reagir à medicação que está recebendo. Com isso, se economizam recursos em saúde e principalmente tempo, um fator do qual a maior parte dos doentes não dispõe.

12 'Isso já foi feito com o câncer de mama. Para metade das mulheres que faziam uso de um remédio, o resultado era excelente. Para a outra, não tinha função nenhuma. Os médicos descobriram que isso acontecia por conta de uma alteração genética', explica o presidente da Sociedade Brasileira de Genética Médica, Salmo Raskin.

13 O teste citado pelo médico brasileiro [...] consegue dizer quais mulheres com câncer de mama se beneficiarão da quimioterapia e quais precisam de outra abordagem de tratamento. [...]"

Fonte: CAMARGO, L. *Mais difícil do que o imaginado.* Disponível em: <http://ultimosegundo.ig.com.br/genomahumano/mais+dificil+do+que+o+imaginado/n1237681612952.html>. Acesso em: mar. 2016.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

Embora o texto deste quadro possa ser considerado de divulgação científica, ele é complexo e exige conhecimentos anteriores, os quais podem ser conferidos no capítulo ou em pesquisas na internet, por exemplo.

1 Leia o primeiro e o segundo parágrafos do texto e atente aos conceitos de sequenciamento do genoma humano e medicina genética. É necessário compreender claramente o que é sequenciamento do DNA para entender mais amplamente a proposta de uma "medicina genética", vaticinada (prevista) por Collins. Pesquise esses assuntos e conceitue, em textos objetivos, cada um deles.

2 O parágrafo 3 faz menção ao diagnóstico pré-implantacional. Escreva um texto pessoal e explicativo sobre o que é esse diagnóstico e por que Collins previa que os limites éticos desse procedimento médico seriam motivo de debate pela sociedade.

3 No parágrafo 4 Collins faz referência ao preconceito genético e à desigualdade no acesso à medicina genética. Escreva um pequeno texto que reúna suas informações de pesquisa sobre o assunto e as previsões de Collins.

4 Leia mais de uma vez o parágrafo 5, pois seu conteúdo precisa ser desvendado e simplificado, eventualmente auxiliado pelo dicionário (p. ex., sôfrega, errática). Após analisar o parágrafo, tente reescrevê-lo em uma linguagem mais acessível a um estudante do ensino médio.

5 O parágrafo 6 traz algumas das dificuldades da aplicação de testes genéticos em doenças como os cânceres, o diabetes, o mal de Alzheimer etc. Que dificuldades são essas? Explique em um texto curto e objetivo.

6 Leia o parágrafo 7 e compare as informações nele tratadas com as do texto que você redigiu sobre o parágrafo 4. De que modo novas informações poderiam ser incorporadas a seu texto?

7 O oitavo parágrafo aborda os novos empreendimentos genéticos do cientista Craig Venter e seus colaboradores. Qual o resultado anunciado pela equipe e seu possível impacto no mundo?

8 Os parágrafos 9 e 10 do texto tratam de uma nova perspectiva no tratamento de doenças genéticas. Qual é ela e em que situação foi empregada com sucesso? Responda em um texto curto e objetivo.

9 Leia o parágrafo 11, que trata da chamada farmacogenômica. Em que consiste essa área de pesquisa e qual é sua possível importância na Medicina?

10 No décimo segundo e no décimo terceiro parágrafos, que encerram o texto, é mencionado um exemplo de emprego da farmacogenômica no tratamento de câncer de mama. Explique por que a descoberta é importante no diagnóstico e no tratamento do câncer de mama.

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. Como é denominado o conjunto de técnicas que visam à seleção e ao aprimoramento das qualidades dos organismos úteis à nossa espécie? 1. c

a) Clonagem.
b) Engenharia Genética.
c) Melhoramento genético.
d) Vigor híbrido ou heterose.

2. O que é Engenharia Genética? 2. a

a) Conjunto de procedimentos empregados na manipulação do DNA.
b) Processo por meio do qual os genes produzem proteínas.
c) Ramo da Biologia que estuda os genes humanos.
d) Ramo especializado na produção de equipamentos científicos.

3. Que nome é dado a um organismo que tem genes de outra espécie incorporados ao seu genoma? 3. c

a) Heterozigótico.
b) Homozigótico.
c) Transgênico.
d) Clone.

4. A que se refere o termo clonagem molecular? 4. d

a) À duplicação normal do cromossomo bacteriano.
b) A um mecanismo de defesa das bactérias contra vírus bacteriófagos.
c) A um processo utilizado para atenuar vírus letais.
d) A uma técnica para multiplicar segmentos específicos de DNA.

5. Amostras de DNA podem ser identificadas pelo conjunto de fragmentos obtidos após o corte com enzimas de restrição e sua posterior separação por 5. a

a) eletroforese.
b) ligases.
c) melhoramento genético.
d) transcrição gênica.

6. Uma ovelha gerada na Inglaterra, Tracy, tinha incorporado em um de seus cromossomos o gene para a enzima antitripsina humana; tratava-se, portanto, de um 6. d

a) clone.
b) híbrido.
c) plasmídio.
d) transgênico.

7. Suponha que uma molécula circular de DNA tenha sido fragmentada em quatro pontos – sítios de corte – por uma endonuclease de restrição. O fragmento maior tinha 62 nucleotídios, e o menor, 12. Os outros fragmentos tinham o mesmo tamanho: 40 nucleotídios. Quantas faixas seriam obtidas em uma eletroferese desses fragmentos e qual deles seria o mais veloz na corrida eletroforética? 7. b

a) 2; o de 62 nucleotídios.
b) 3; o de 12 nucleotídios.
c) 4; o de 62 nucleotídios.
d) 5; o de 12 nucleotídios.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

8. Informe-se sobre a polêmica que envolve o uso de organismos transgênicos na agricultura e redija um texto dissertativo sobre o assunto. Quais são os principais argumentos contra a utilização desse tipo de tecnologia e a favor dela?

9. Leia o trecho de reportagem a seguir e responda às questões propostas.

> [...]
>
> Para produzir os animais transgênicos, os cientistas injetam em seus embriões pedaços de DNA especialmente montados em laboratório (chamados “construções”), contendo o gene de interesse da pesquisa e uma série de outros códigos genéticos associados ao seu funcionamento.
>
> Seja qual for o método aplicado, a ideia é que essa construção se integre ao genoma do embrião e passe a funcionar como se fosse parte original dele – algo como embutir um *software* genético no sistema operacional do bicho. Dependendo do que estiver escrito nesse *software*, ele pode executar uma série de funções, como inibir a ação de algum outro gene ou ordenar a superexpressão de uma proteína cuja função os cientistas desejam estudar. [...]
>
> Manipulações que não podem ser feitas em seres humanos. Mas que, pela semelhança genética entre homens e camundongos, podem dar contribuições diretas para o conhecimento da biologia humana e para a cura de doenças.
>
> [...]

Disponível em: <www.estadao.com.br/noticias/impresso,pais-inicia-producao-de-animais-transgenicos,903716,0.htm>. Acesso em: mar. 2016.

a) Nesse trecho da reportagem, fica subentendido que há mais de uma maneira de produzir uma "construção" genética. Confira neste capítulo quais são essas maneiras e escreva um parágrafo que possa ser inserido na reportagem, para complementá-la. Indique onde você inseriria esse parágrafo.

b) O que a matéria quer dizer ao comparar a "construção" introduzida em um organismo a um *software*? Por que essas analogias da informação genética com os sistemas de informática usados em computadores são comuns? Escreva uma dissertação curta a respeito.

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

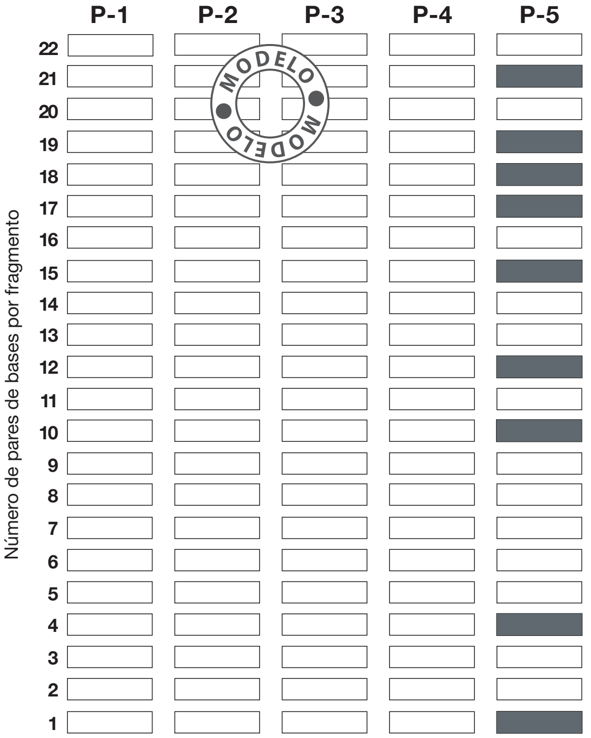
10. Atividade prática: Simulando a identificação por DNA

Nesta atividade, você aplicará os princípios da identificação de pessoas pelo DNA na solução de duas questões judiciais. Em uma delas, identificará um criminoso entre três suspeitos e, na outra, descobrirá quem é o pai de uma criança.

Em primeiro lugar, faça uma reprodução (escaneada ou xerocopiada) da página 99, que contém representações de segmentos de DNA de cinco pessoas (P-1 a P-5). Cada pessoa tem dois segmentos de DNA representados, correspondentes a um par de cromossomos homólogos (C_A e C_B). As sequências de bases desses cromossomos podem ser ligeiramente distintas em função da diferença entre os alelos.

O próximo passo para a análise do DNA é cortá-lo com uma enzima de restrição hipotética, que, neste exemplo, reconhece a sequência de dois pares de bases C-G adjacentes (dois C em uma cadeia e dois G na fita complementar). Para facilitar, essas "sequências de corte" estão destacadas no DNA das cinco pessoas. Utilizando a reprodução da página 99, localize, nos dois segmentos de DNA de cada pessoa, todas as sequências de corte; a seguir, recorte-as com uma tesoura ou marque-as a lápis com um traço horizontal, a fim de separar um par C-G do par C-G adjacente.

A seguir organize os fragmentos de DNA de cada indivíduo por ordem de tamanho. Esse procedimento simula o processo de eletroforese, visto neste capítulo. Conte o número de pares de bases de cada fragmento e, utilizando uma reprodução (escaneada, xerocopiada ou esquematizada pelos alunos no caderno ou em papel quadriculado) do desenho do gráfico ao lado, complete as informações de cada pessoa. Cada coluna do gráfico simula o padrão eletroforético de um indivíduo, em que os fragmentos de DNA se distribuem em faixas por ordem de tamanho. A título de exemplo, a coluna correspondente ao padrão da pessoa P-5 já está preenchida.



ADILSON SECCO

Com essas informações, você está pronto para resolver os dois casos apresentados a seguir.

a) Restos de pele encontrados sob as unhas da vítima (P-4) de um assassinato foram submetidos ao teste de DNA, revelando o padrão eletroforético P-5. Três pessoas, P-1, P-2 e P-3, suspeitas do crime, também foram submetidas ao teste de DNA. Qual delas é a provável culpada? **Quem é o criminoso?**

b) Dois homens, P-1 e P-2, disputam a paternidade de uma criança (P-4), filha da mulher P-3. Com base no teste de DNA dos quatro implicados, quem é o provável pai? **Quem é o pai da criança?**

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFRN) As técnicas de Engenharia Genética possibilitaram a produção de grandes quantidades de insulina por bactérias que receberam o gene humano para esse hormônio. Tal feito só foi possível pelo emprego das enzimas de restrição, que agem 1. d

a) traduzindo o gene da insulina para o código genético da bactéria.
b) ligando o pedaço do DNA humano no DNA da bactéria.
c) identificando os aminoácidos codificados pelo gene.
d) cortando o DNA da bactéria em pontos específicos.

2. (UFRR) Com relação a organismos transgênicos, a alternativa correta é: 2. c

a) Sofrem mudanças nas características fenotípicas ao longo da vida.
b) Animais transgênicos são produzidos a partir de aprimoramento de determinadas qualidades na espécie.
c) Possuem parte da informação genética de outro ser vivo.
d) Organismos transgênicos são aqueles que recebem o DNA da mesma espécie.
e) A alteração genética de animais e plantas não interfere na evolução natural das espécies.

3. (Ufal) A tecnologia do DNA recombinante tem produzido uma série de avanços no setor agropecuário brasileiro. A inserção de um gene da bactéria *Bacillus thuringiensis* em algumas variedades de plantas, por exemplo, as torna resistentes a certas pragas. Sobre essas tecnologias, é correto afirmar: 3. c

a) a transferência de qualquer gene de um organismo a outro produz variabilidade genética; daí, os transgênicos serem resistentes a pragas.
b) plasmídios virais são utilizados como vetores de genes de interesse que serão transferidos a um organismo.
c) a resistência de uma planta transgênica a uma praga se deve à ação do produto do gene inserido na planta, e não à presença do gene em si.
d) plantas naturalmente resistentes a pragas não passam necessariamente essa característica à prole; daí, a necessidade das técnicas de Engenharia Genética.
e) a clonagem de plantas com características de resistência a pragas as torna menos suscetíveis à extinção ao longo da evolução, segundo as leis da seleção natural.

4. (UFSM-RS) Bioma é uma região com o mesmo tipo de clima, possui plantas e animais característicos [*Planeta Terra: Ecossistemas*, 2008]. Mas, como a interferência do homem na natureza é constante, os cientistas criaram uma nova espécie de mosquito da malária modificado geneticamente para não transmitir essa doença e o introduziram na Amazônia. Então, é correto afirmar que 4. e

a) modificar geneticamente um mosquito não significa alterar o seu DNA.
b) modificar um organismo geneticamente significa cruzar espécies diferentes.
c) a modificação genética dos mosquitos pode ser feita pelo cruzamento dos mosquitos da malária com outros tipos de insetos, gerando novas combinações.
d) os ambientalistas defendem o uso da Engenharia Genética, pois os seus efeitos são totalmente previstos e controlados, não trazendo perigo para a humanidade.
e) transgenia significa a inserção de um gene de uma espécie diferente em outra espécie.

5. (Uece) Um dos assuntos polêmicos da atualidade é a produção de alimentos transgênicos como resultado da interferência humana na natureza. Sobre o referido tema podemos afirmar, **corretamente**, que 5. a

a) a modificação de organismos através de técnicas de Engenharia Genética consiste na transferência de genes de uma espécie para outra.
b) através das técnicas de Engenharia Genética os cientistas têm como único objetivo a criação de novas espécies que possam substituir as espécies atualmente comercializadas.
c) organismos geneticamente modificados não podem transmitir os genes incorporados à sua prole.
d) a principal função da Engenharia Genética é a produção de transgênicos através da seleção e aprimoramento das espécies a partir do cruzamento entre organismos modificados.

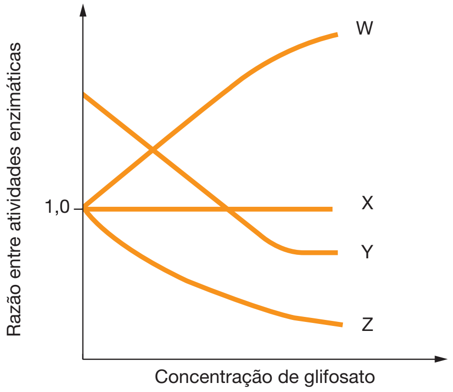
6. (UFG-GO) No que se refere ao desenvolvimento do chamado milho híbrido, sabe-se que o cruzamento de duas linhagens homozigotas selecionadas pode produzir espigas maiores e de melhor qualidade comercial, em consequência da alta 6. c

a) interação de genes recessivos.
b) taxa de *crossing-over*.
c) frequência de genes em heterozigose.
d) inativação de alelos codominantes.
e) ocorrência de pleiotropia.

7. (Uerj) A enzima EPSP-sintase, presente em praticamente todos os vegetais, é modificada na soja transgênica, tornando-a resistente à inibição pelo herbicida glifosato. Assim, o tratamento com esse herbicida não prejudica o desenvolvimento de culturas de soja transgênica, mas evita o crescimento de outros vegetais indesejáveis.

Num estudo para a identificação da variedade transgênica de soja, foi medida, nas mesmas condições experimentais, a atividade da EPSP-sintase em extratos de folhas de diferentes tipos desse vegetal, em presença ou ausência de glifosato. As atividades da enzima nesses extratos, na ausência do inibidor, apresentaram o mesmo valor.

Observe o gráfico:



LUIZ RUBIO

A curva que corresponde à razão entre as atividades de uma enzima da variedade transgênica e as atividades dessa mesma enzima da soja comum é a indicada pela seguinte letra: 7. a

a) W.

b) X.

c) Y.

d) Z.

8. (Fuvest-SP) O anúncio do sequenciamento do genoma humano, em 21 de junho de 2000, significa que os cientistas determinaram 8. a

a) a sequência de nucleotídios dos cromossomos humanos.

b) todos os tipos de proteína codificados pelos genes humanos.

c) a sequência de aminoácidos do DNA humano.

d) a sequência de aminoácidos de todas as proteínas humanas.

e) o número correto de cromossomos da espécie humana.

Questões discursivas

9. (UEG-GO) Durante décadas, o homem vem se utilizando de microrganismos para a obtenção de diversos produtos e processos, inclusive pão, cerveja, vinho e queijo. No entanto, nas últimas décadas, as aplicações práticas dos microrganismos expandiram-se de forma surpreendente com o desenvolvimento de novas técnicas, como a do DNA recombinante.
Sobre esse assunto, responda ao que se pede.

a) Em que consiste o processo do DNA recombinante em bactérias?

b) Cite duas aplicações práticas para essa técnica.

10. (Ufes) A partir da década dos 1970, as moléculas de ácidos nucleicos da célula passaram a ser exploradas através da utilização de novas metodologias, conhecidas como tecnologia do DNA recombinante.
Por meio dessa tecnologia, a medicina e a indústria ganharam alternativas eficientes para a produção, em grande escala, de determinadas proteínas, que antes eram disponíveis em quantidades extremamente reduzidas.

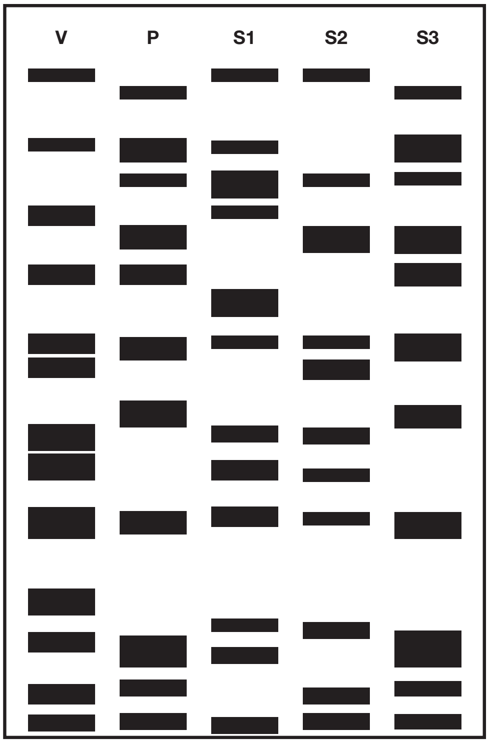
a) Qual é a função das endonucleases de restrição e a das ligases na aplicação da tecnologia anteriormente citada?

b) Explique como a tecnologia do DNA recombinante participa no processo de produção de organismos transgênicos.

c) Cite dois produtos, utilizados pelo homem, que foram obtidos a partir da aplicação da tecnologia do DNA recombinante.

11. (UFU-MG) Dentre as aplicações atuais da Genética Molecular, temos os testes de identificação de pessoas por meio do DNA. Essa técnica, que pode ser usada para identificar suspeitos em investigações policiais, consiste em detectar e comparar sequências repetitivas ao longo de trechos da molécula de DNA, regiões conhecidas como VNTR (número variável de repetições em sequência).

A figura a seguir ilustra os padrões de VNTRs de quatro pessoas envolvidas, uma vítima (V) e 3 suspeitos (S1, S2 e S3), em uma investigação policial e de uma prova (P) coletada no local do crime:



REPRODUÇÃO

Considerando as afirmações e a figura acima apresentada, responda:

a) A qual dos suspeitos (S1, S2 ou S3) pertence a prova (P)? Justifique a sua resposta.

b) Que tipo de material pode ser coletado e servir de prova em um caso como esse?

c) Por que os resultados desse tipo de análise têm alto grau de confiabilidade?

12. (UFRJ) Em junho de 2001, foi publicada a sequência quase completa do genoma humano. Esse projeto contou com a participação de diversos laboratórios, que individualmente determinaram a sequência de vários trechos diferentes do DNA de todos os cromossomos, a partir da amostra de somente um indivíduo, que permaneceu anônimo. Sabe-se, no entanto, que o DNA era de um indivíduo do sexo masculino. Por que foi importante determinar a sequência do DNA de um homem e não de uma mulher?

Reproduzir esta página para realização da atividade 10 do *Faça você mesmo!*

Não recorte esta página. Ela deve ser reproduzida (escaneada ou xerocopiada).

P-1		P-2		P-3		P-4			P-5		
C_A	C_B	C_A	C_B	C_A	C_B	C_A	C_B		C_A	C_B	
C-G	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	1	***C-G***	***C-G***	1
C-G	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***		***C-G***	***C-G***	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G		C-G	C-G	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G		C-G	C-G	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
C-G	***C-G***	***C-G***	T-A	T-A	T-A	***C-G***	T-A		T-A	***C-G***	15
C-G	***C-G***	***C-G***	C-G	C-G	C-G	***C-G***	C-G		C-G	***C-G***	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
C-G	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	19	***C-G***	***C-G***	4
C-G	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***	***C-G***		***C-G***	***C-G***	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
G-C	A-T	A-T	G-C	A-T	G-C	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
A-T	A-T	A-T	A-T	***G-C***	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
G-C	G-C	G-C	G-C	***G-C***	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
C-G	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	***C-G***	T-A		T-A	T-A	
C-G	C-G	***C-G***	***C-G***	C-G	***C-G***	***C-G***	***C-G***	12	***C-G***	***C-G***	12
T-A	T-A	***C-G***	***C-G***	T-A	***C-G***	T-A	***C-G***		***C-G***	***C-G***	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
G-C	***G-C***	***G-C***	G-C	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***		G-C	***G-C***	4
G-C	***G-C***	***G-C***	A-T	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***		A-T	***G-C***	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G		C-G	C-G	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
C-G	T-A	T-A	***C-G***	T-A	***C-G***	***C-G***	***C-G***	17	***C-G***	T-A	
C-G	C-G	C-G	***C-G***	C-G	***C-G***	***C-G***	***C-G***		***C-G***	C-G	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C		G-C	G-C	
C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G		C-G	C-G	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
C-G	***C-G***	***C-G***	C-G	***C-G***	C-G	***C-G***	C-G		C-G	***C-G***	21
C-G	***C-G***	***C-G***	T-A	***C-G***	T-A	***C-G***	T-A		T-A	***C-G***	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G		C-G	C-G	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
A-T	G-C	G-C	A-T	G-C	G-C	A-T	G-C		G-C	G-C	
C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G	C-G		C-G	C-G	
A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T	A-T		A-T	A-T	
T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A	T-A		T-A	T-A	
G-C	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	18	***G-C***	***G-C***	10
G-C	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***	***G-C***		***G-C***	***G-C***	
								1			1

MÓDULO 2

A evolução biológica

STAATLICHES DARWIN-MUSEUM – RÚSSIA

Conheça os capítulos deste módulo

A necessidade de entender a natureza e os seres vivos parece ser inerente à espécie humana: explicações míticas sobre a criação do universo, do mundo e dos seres da natureza estão presentes em todas as culturas. Com o desenvolvimento do pensamento científico a partir do Renascimento europeu, a metodologia e os pressupostos da ciência passaram a ser empregados para elaborar teorias científicas sobre a origem do universo, da Terra e dos seres vivos. Neste módulo, estudaremos como a origem dos seres vivos e as mudanças pelas quais eles têm passado, ao longo dos bilhões de anos de existência da Terra, são explicadas pela ciência à luz da teoria evolucionista.

Capítulo 5

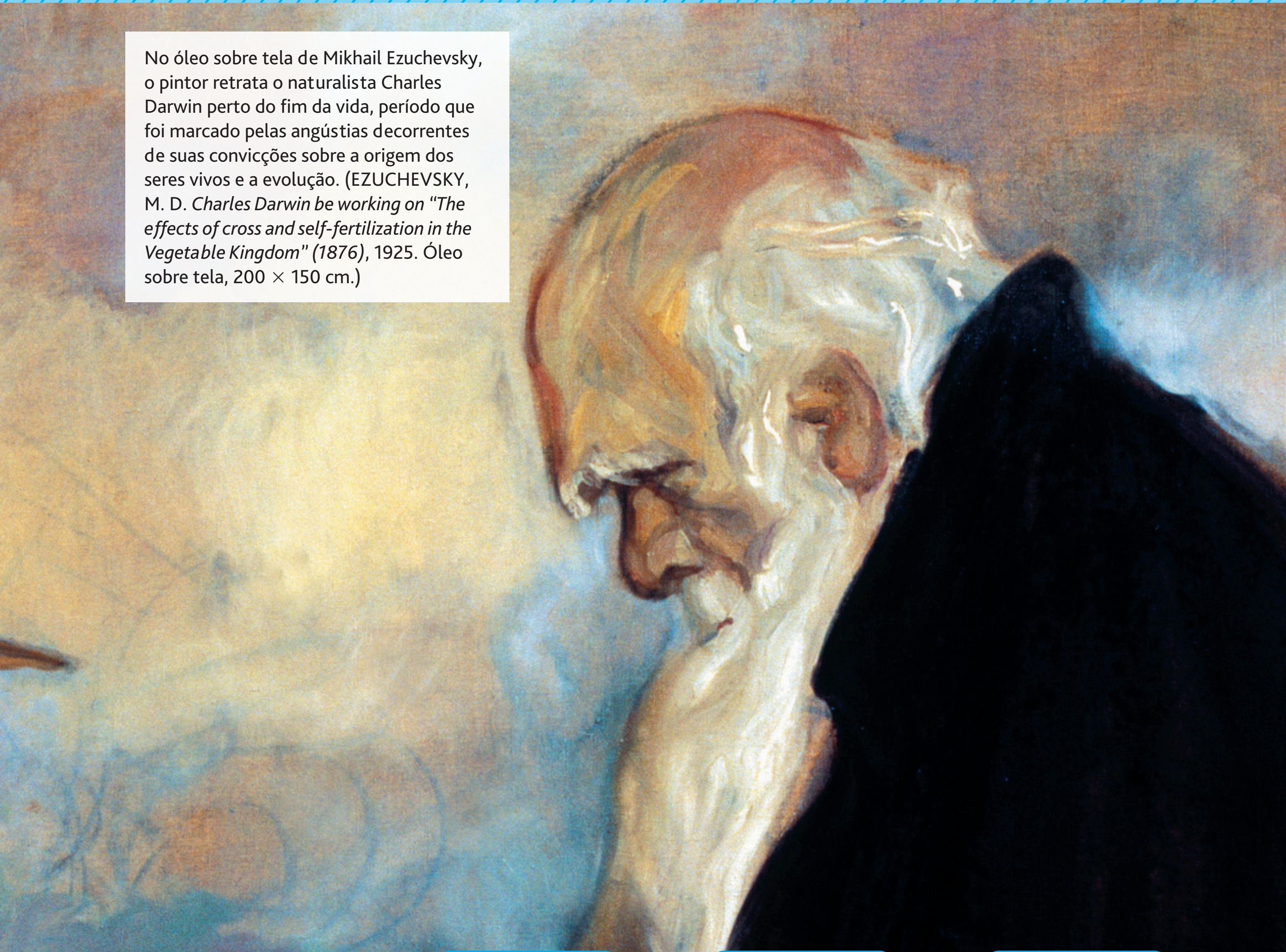
Apresentamos uma breve história do pensamento evolucionista, com ênfase no trabalho de Charles Darwin, considerado por muitos um dos mais importantes cientistas de todos os tempos. Discutimos também as principais evidências a favor da evolução biológica e dos pontos centrais da teoria sintética da evolução.

Capítulo 6

Abordamos como ocorre a formação de novas espécies de seres vivos de acordo com a teoria evolucionista. A especiação, atuando ininterruptamente durante os bilhões de anos de evolução, é a responsável pela grande árvore da vida, que inclui milhões de espécies viventes e um número incalculável de espécies extintas. Este capítulo pode ser visto como o roteiro de uma monumental história, da qual também fazemos parte: a colonização da Terra pelos seres vivos.

Capítulo 7

Estudamos a origem e a evolução da espécie humana. A visão científica sobre nossa ancestralidade tem passado por alterações significativas nos últimos anos, tanto em decorrência de novas descobertas e de novos métodos de análise como por mudanças da perspectiva teórica sobre o processo evolutivo. A ciência busca explicações plausíveis para a origem da espécie humana. Entre outros assuntos, este capítulo aborda as seguintes questões: Como ocorreu a origem do ser humano? Há quanto tempo? Quais são as evidências de nosso parentesco com outros animais?



No óleo sobre tela de Mikhail Ezuchevsky, o pintor retrata o naturalista Charles Darwin perto do fim da vida, período que foi marcado pelas angústias decorrentes de suas convicções sobre a origem dos seres vivos e a evolução. (EZUCHEVSKY, M. D. *Charles Darwin be working on "The effects of cross and self-fertilization in the Vegetable Kingdom" (1876)*, 1925. Óleo sobre tela, 200 × 150 cm.)

Capítulo 5

VATICAN MUSEUMS AND GALLERIES, VATICAN CITY

Os fundamentos da evolução biológica

Itens principais:

- O pensamento evolucionista
- Evidências da evolução biológica
- A teoria sintética da evolução
- Adaptação e evolução

Capítulo 6

CHRIS BUTLER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos

Itens principais:

- O processo evolutivo e a diversificação da vida
- A origem dos grandes grupos de seres vivos

Capítulo 7

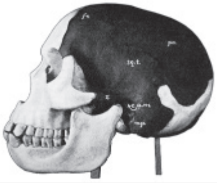


IMAGE ASSET MANAGEMENT/AGB PHOTO LIBRARY/KEYSTONE BRASIL

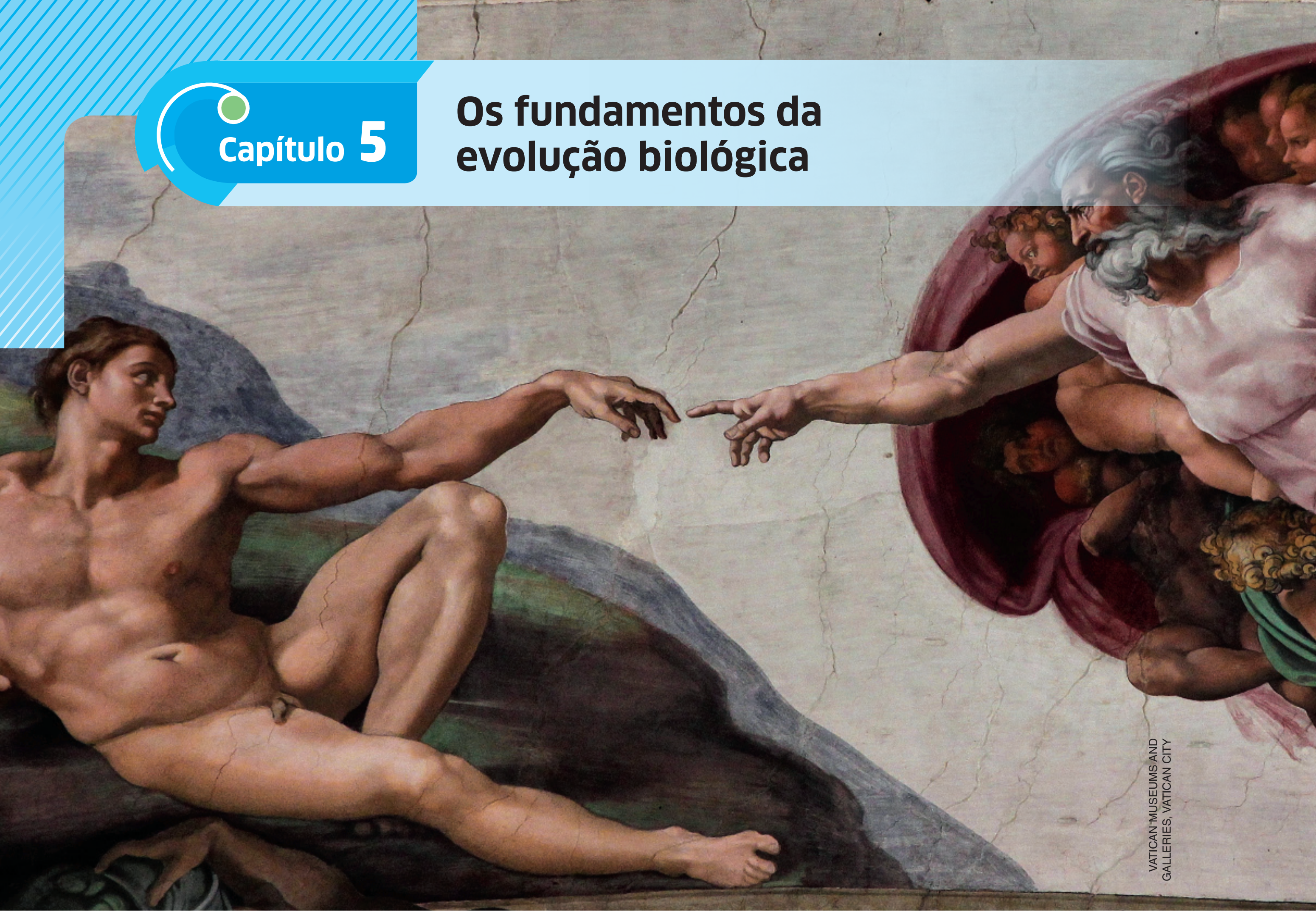
Evolução humana

Itens principais:

- Nosso parentesco evolutivo com os grandes macacos
- História evolutiva dos primatas
- A ancestralidade humana

Capítulo 5

Os fundamentos da evolução biológica


VATICAN MUSEUMS AND GALLERIES, VATICAN CITY

Em seu famoso afresco pintado entre 1508 e 1512 no teto da Capela Sistina, no Vaticano, Michelangelo retrata o mito bíblico da criação do homem por Deus.

Mitos de criação

A *Teogonia* (lit. *o nascimento dos deuses*), poema épico atribuído ao grego Hesíodo (século VIII a.C.), conta que no princípio reinava Caos, o deus primordial, imerso nas águas e sozinho nas trevas. Um dia, cansado da solidão, Caos resolveu criar o mundo, representado em diversos deuses: Gaia, a Terra; Eros, o amor; Tártaro, o mundo inferior; Érebo, a escuridão do espaço; e Nix, a noite. Gaia gerou sozinha três filhos: Urano, o firmamento; Ponto, as águas; e Óreas, as montanhas. Mais tarde, Gaia casou-se com Urano e um de seus filhos – Cronos, o tempo – tornou-se um dos deuses mais poderosos, antes do reinado de Zeus, a divindade suprema para os gregos.

Para os antigos egípcios, no começo o mundo não passava de um imenso rio de águas turvas em borbulhante caos, representado pelo deus ancestral Nun. Das profundezas das águas, do caos primordial de Nun, nasceu Aton. Ao surgir das águas, Aton manifestou-se na forma de uma flor de lótus, do interior da qual emergiu Rá, o deus-Sol. Este gerou dois filhos: Shu, deus do ar, e Tefnut, representação da umidade e das águas. Juntos, esses dois filhos criaram Geb, a terra, e Nut, o céu.

Uma das versões bíblicas da criação do mundo afirma que no início havia somente água, sobre a qual pairava o espírito de Deus. Então Deus soprou a superfície líquida e surgiu a luz, que passou a iluminar as trevas. Isso ocorreu no primeiro dia da criação. No segundo dia, Ele criou o céu; no terceiro, a fertilidade do solo e as plantas, inclusive as frutíferas. No quarto dia, Deus criou o Sol, a Lua e as estrelas, colocando-os em seus devidos lugares no firmamento. No quinto dia, foram criados os peixes na água e as aves no céu. No sexto dia, Deus povoou a Terra com todas as espécies de animais e criou o homem à sua imagem e semelhança. No sétimo dia, descansou.

Alguns estudantes, principalmente aqueles com formação religiosa, geralmente levantam questões sobre a suposta incompatibilidade entre ciência e religião no que se refere à origem dos diferentes tipos de seres vivos e da espécie humana. É importante ressaltar que religião e ciência têm objetivos distintos: religião busca um sentido para a existência humana, enquanto a ciência tenta explicar fatos da natureza. Pode ser interessante promover discussões com os estudantes sobre o ensino da evolução dos seres vivos nas escolas e sua relação com a religião, até para mostrar o perigo da intolerância ideológica e a necessidade do debate livre e aberto no campo das ideias, tanto sobre nossas origens como sobre qualquer outro tema importante.

A civilização inca, que floresceu nos Andes antes da chegada dos europeus, acreditava que o Sol e a Lua eram ancestrais diretos dos seres humanos.

Os antigos povos *vikings*, entre seus muitos deuses, atribuíam a Odin a criação do primeiro homem e da primeira mulher a partir de dois troncos de árvores que encontrou ao caminhar por uma praia.

A importância do assunto

Mitos de criação, presentes em praticamente todas as culturas, refletem o contexto histórico em que surgiram e demonstram uma necessidade essencialmente humana: explicar a natureza e a origem dos seres vivos. Essas explicações mitológicas, de natureza mística ou sobrenatural, pressupõem a existência de entidades onipotentes – que genericamente chamamos de deuses –, responsáveis pela criação e pelo controle da natureza.

O mito de criação mais difundido entre os povos ocidentais, de tradição judaico-cristã, surgiu em antigas tribos hebraicas do Oriente Médio e aparece no livro bíblico do Gênesis. Atualmente, a maioria dos cristãos e judeus considera o mito da criação descrito na Bíblia uma explicação alegórica para a criação do universo. No entanto, há correntes fundamentalistas que defendem a interpretação literal da Bíblia e rejeitam as explicações científicas para as origens do universo e da vida.

O desenvolvimento do pensamento científico a partir do Renascimento europeu possibilitou o emprego da metodologia e dos pressupostos da ciência para apresentar uma teoria bem fundamentada para a origem do universo, da Terra e dos seres vivos. Para a ciência atual, o universo, constituído por espaço, tempo, matéria e energia, surgiu no momento do *big bang*, sem nenhuma intervenção sobrenatural, e desde então evolui continuamente. A evolução universal tem levado à formação de estrelas, galáxias e planetas, um dos quais é a Terra. Neste planeta, onde vivemos, a vida surgiu, evoluiu e continua a evoluir.

Neste capítulo e nos próximos, vamos estudar como a ciência biológica explica, à luz da teoria evolucionista, a origem dos seres vivos e as mudanças pelas quais eles têm passado ao longo dos bilhões de anos de existência da Terra. Conhecer o que a ciência diz a respeito de nossas origens ajuda a refletir sobre nossa história e nossa relação com o universo, do qual fazemos parte.

5.1 O pensamento evolucionista

Até o início da primeira metade do século XIX, a maioria dos naturalistas europeus adotava o **fixismo** das espécies, concepção segundo a qual os tipos de seres vivos não se alteram ao longo do tempo. Em outras palavras, de acordo com essa doutrina, as espécies atuais de seres vivos seriam as mesmas que existiram no passado, embora pudesse haver pequenas variações entre os membros de uma espécie.

A maior parte dos naturalistas, inclusive Lineu, também aceitava o **criacionismo**, doutrina que atribui o surgimento das espécies biológicas a um ato divino de criação, como o descrito na Bíblia.

O desenvolvimento da ciência e a descoberta de novos continentes, com faunas e floras tipicamente distintas das europeias, começaram a abalar as antigas explicações religiosas para os fenômenos naturais. No século XVIII, já havia naturalistas não fixistas, que admitiam a transformação das espécies. No decorrer do século XIX foram publicadas as primeiras obras que defendiam a possibilidade de os seres vivos se modificarem ao longo do tempo, com espécies originando outras. Estabeleciam-se, assim, as bases da teoria evolucionista, também conhecida por **evolucionismo**.

Embora tanto o criacionismo quanto o evolucionismo busquem explicações para a origem dos seres vivos, há entre eles uma diferença fundamental: o criacionismo invoca o sobrenatural para explicar fenômenos da natureza. Portanto, as explicações criacionistas para a origem do universo e dos seres vivos situam-se no nível das crenças religiosas, fundamentando-se em dogmas, ideias e pressupostos revelados de forma sobrenatural, geralmente considerados certos e indiscutíveis, verdades absolutas e eternas que não admitem questionamento.

A ciência, por sua vez, parte do princípio de que não existem verdades inquestionáveis e que sempre há possibilidade de novas explicações para determinado fenômeno natural. A essência do pensamento científico consiste em basear as explicações dos fenômenos naturais em fatos e processos da própria natureza, sem jamais recorrer a explicações sobrenaturais ou dogmáticas. Em ciência, a única maneira de validar ou refutar uma explicação para um fenômeno natural é submetê-la a testes científicos rigorosos. As explicações dos fenômenos atualmente aceitas pela ciência vêm sendo continuamente testadas e não foram refutadas. Uma explicação científica nunca é considerada uma verdade absoluta; ela é aceita como verdadeira enquanto não houver razões para duvidar de sua veracidade.

Apoiado por evidências científicas de ordem cosmológica, geológica, arqueológica e antropológica, o evolucionismo tem passado por rigorosos testes e é, por enquanto, do ponto de vista da ciência, a única explicação racional e coerente para o conjunto de fatos sobre a origem e a diversidade dos seres vivos na Terra. O biólogo ucraniano naturalizado estadunidense Theodosius Dobzhansky (1900-1975), em artigo publicado em 1973, escreveu (em tradução livre): “Interpretada à luz da evolução, a Biologia é, do ponto de vista intelectual, talvez a mais inspirada e satisfatória das ciências. Sem essa luz, a Biologia torna-se uma miscelânea de fatos, alguns deles interessantes ou curiosos, mas desprovidos de significado quando considerados em conjunto”. (Fig. 5.1)

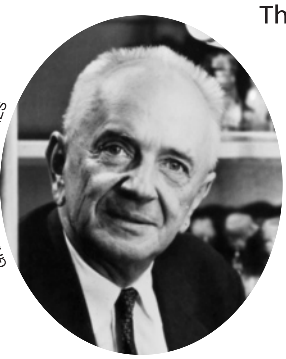

GRANGER/GLOW IMAGES

Figura 5.1 Theodosius Dobzhansky, um dos mais importantes biólogos do século XX publicou, em 1973, na revista *American Biology Teacher* (35: 125-129), o artigo “Nothing in biology makes sense except in the light of evolution” (Nada em Biologia faz sentido a não ser sob a luz da evolução), desafiando o movimento criacionista que tentava aprovar leis para excluir o ensino da evolução nas escolas públicas estadunidenses. (Fotografia da década de 1960.)

Ideias evolucionistas de Lamarck

Um nome sempre lembrado na história do pensamento evolucionista é o do francês Jean-Baptiste Antoine de Monet (1744-1829), que, por seu título de Cavaleiro de Lamarck, ficou mais conhecido como Jean-Baptiste Lamarck. De 1800 a 1822, ele publicou uma série de versões de sua teoria evolucionista. A mais conhecida delas encontra-se no livro *Philosophie zoologique* (*Filosofia zoológica*), de 1809. Os historiadores da ciência costumam se referir às ideias e aos pressupostos da teoria evolucionista de Lamarck como **lamarckismo**. (Fig. 5.2)

De acordo com o lamarckismo, cada espécie atual de ser vivo surgiu por transformações sucessivas de uma forma primitiva originada de matéria não viva. Lamarck acreditava que formas primitivas de vida surgiram por geração espontânea, em diversos momentos da existência da Terra, e que elas se modificavam ao longo das gerações em virtude de uma suposta tendência da natureza em aumentar sua complexidade. As ideias lamarckistas sofreram duras críticas desde sua publicação, principalmente por não se apoiarem em fatos observáveis e testáveis.

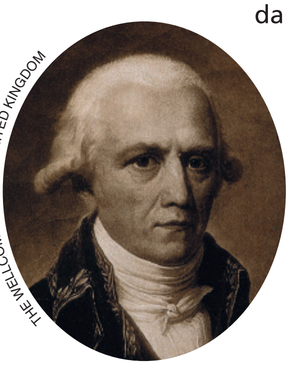

THE WELLCOME LIBRARY, UNITED KINGDOM

Figura 5.2 Retrato de Jean-Baptiste Antoine de Monet, o Cavaleiro de Lamarck. (Gravura do século XIX.)

Lamarck ficou conhecido, talvez, menos por suas ideias evolucionistas – geração espontânea das formas ancestrais e tendência ao aumento de complexidade – do que por suas criativas explicações para a influência do ambiente nas transformações evolutivas dos seres vivos. Ele afirmava que o ambiente pode forçar a mudança de hábitos de um organismo, levando ao desenvolvimento exacerbado de certas estruturas e à atrofia de outras, em função do uso e do desuso dos órgãos; essas explicações resumem o que Lamarck denominou **lei do uso e desuso**.

Para ilustrar essa ideia, Lamarck citou como exemplo a ausência de pernas nas serpentes atuais, atribuindo-a à falta de uso dos membros locomotores pelos ancestrais desses animais. A adaptação a um modo de vida rastejante teria levado os ancestrais das serpentes a usarem cada vez menos os membros locomotores, característica que seria transmitida às descendências ao longo das gerações. Essas explicações para o desaparecimento completo das pernas nas serpentes atuais ilustram o que Lamarck denominou **lei da transmissão das características adquiridas**. (Fig. 5.3)

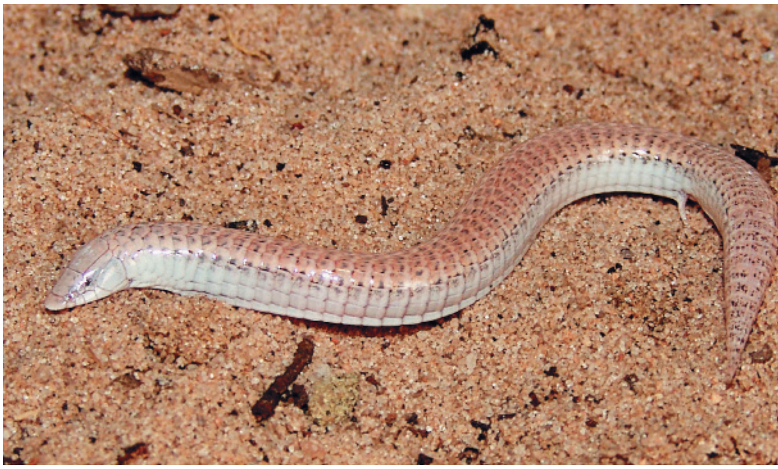

MIGUEL TREFAUT RODRIGUES

Figura 5.3 O lagarto *Calyptommatus leiolepis*, da região de dunas de Alagoado (PI), apresenta cerca de 7 cm de comprimento e redução dos membros até sua quase completa ausência (note uma pequena perna traseira). Na visão lamarckista, a redução dos membros desse animal seria explicada pelas leis do uso e desuso e da transmissão das características adquiridas. Para a moderna teoria evolucionista, essas características resultam da adaptação ao ambiente por ação da seleção natural.

Outro exemplo bem divulgado das ideias evolucionistas de Lamarck refere-se à origem do longo pescoço das girafas atuais. Segundo o lamarckismo, os ancestrais da girafa tinham pescoços curtos, mas o esforço para obterem alimento da copa das árvores levou ao aumento no comprimento do órgão, de acordo com a lei do uso e desuso. A característica adquirida pelo uso intensivo, o aumento de tamanho do pescoço, teria sido transmitida aos descendentes, de acordo com a lei da transmissão de características adquiridas. Assim, a cada nova geração, as girafas teriam pescoços ligeiramente mais longos que os da geração anterior.

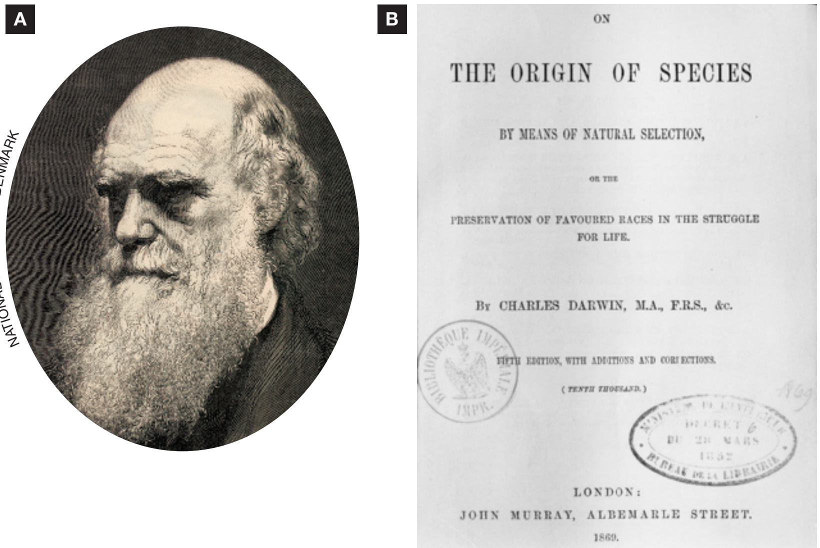
As ideias centrais da lei do uso e desuso e da lei da transmissão das características adquiridas não foram criadas por Lamarck; eram aceitas na época e chegaram até a ser equivocadamente adotadas por Darwin. Hoje se sabe que alterações decorrentes do uso ou do desuso dos órgãos corporais não são transmitidas à descendência. Consequentemente, o pressuposto central do lamarckismo não tem validade científica.

A principal contribuição de Lamarck ao evolucionismo foi destacar o fenômeno da adaptação dos seres vivos ao ambiente, que resultaria de modificações lentas e graduais ao longo de inúmeras gerações. A importância de Lamarck para o pensamento evolucionista pode ser notada nas próprias palavras de Darwin, registradas em uma das edições do livro *A origem das espécies*. A seu ver, o naturalista francês foi o primeiro a chamar a atenção para a possibilidade de todas as mudanças, não apenas do mundo orgânico, mas também do mundo inorgânico, serem decorrentes de leis naturais e não de interferência divina.

É interessante levar os estudantes a imaginar o contexto social da época de Darwin, que sofreu a angústia de ter de desafiar dogmas vigentes, dos quais ele próprio e seus familiares partilhavam. Se houver tempo e interesse, converse com seus colegas de História e de Filosofia a respeito da possibilidade de realizar trabalhos conjuntos sobre as ideias evolucionistas. Algumas propostas de temas a serem trabalhados com essas disciplinas encontram-se no **Suplemento para o professor**.

Ideias evolucionistas de Darwin

O naturalista inglês Charles Robert Darwin (1809-1882) nasceu em 12 de fevereiro de 1809, mesmo ano da publicação da *Filosofia zoológica* de Lamarck. De acordo com o evolucionista alemão naturalizado estadunidense Ernst Mayr (1904-2005), Darwin não se limitou a defender a evolução biológica, mas a explicou com base em fenômenos e processos cotidianos que qualquer pessoa pode observar por si mesma na natureza. Muitas das observações que levaram Charles Darwin a elaborar sua teoria evolucionista ocorreram durante a viagem de cinco anos que ele fez pelo mundo como naturalista do navio inglês H. S. S. Beagle. (Fig. 5.4)



NATIONAL LIBRARY OF DENMARK

ON

THE ORIGIN OF SPECIES

BY MEANS OF NATURAL SELECTION,

OR THE

PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE
FOR LIFE.

By CHARLES DARWIN, M.A., F.R.S., &c.

FIFTH EDITION, WITH ADDITIONS AND CORRECTIONS.

(TENTH THOUSAND.)

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1869.

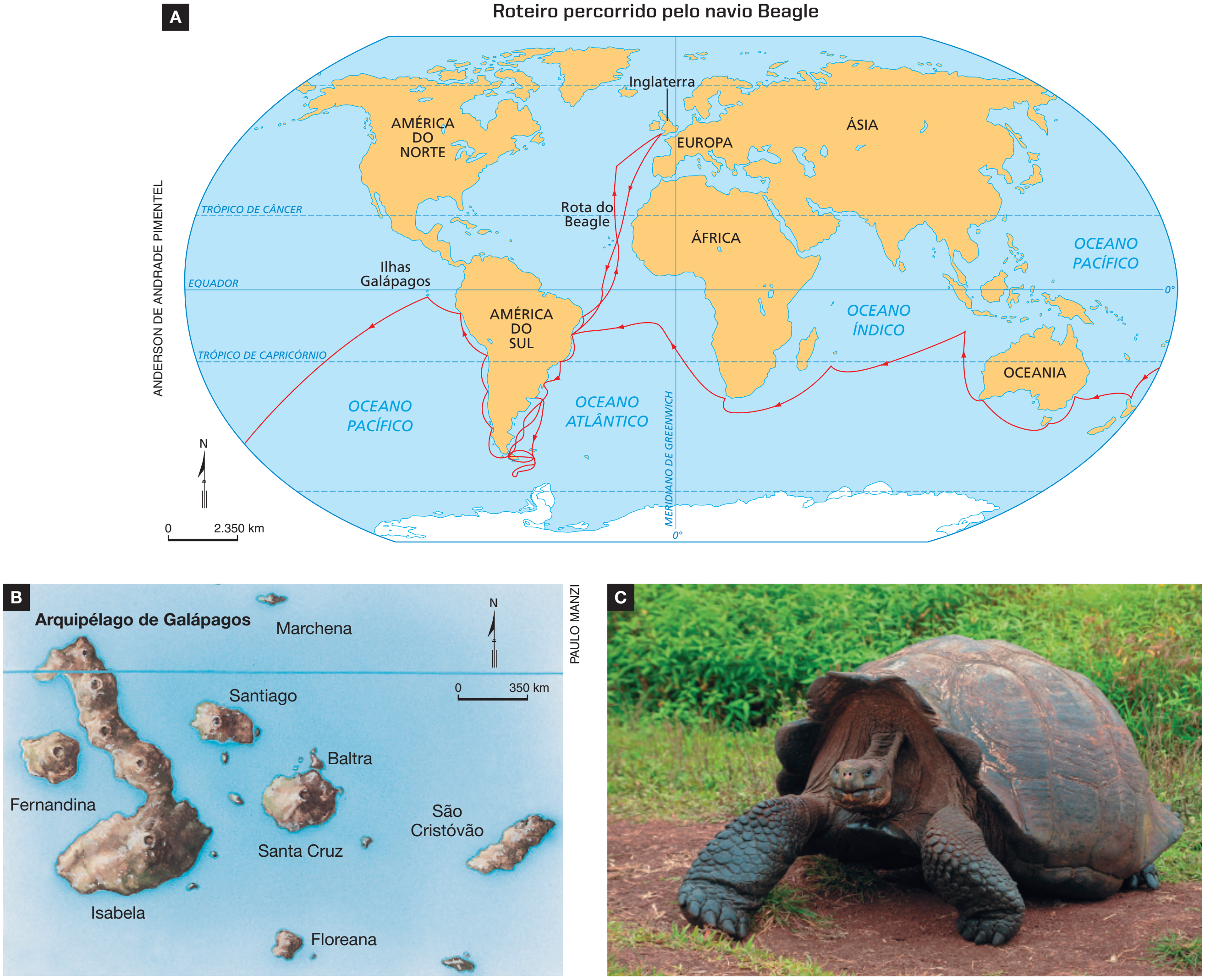
REPRODUÇÃO

Figura 5.4 A. Retrato de Charles Robert Darwin, 1874.
B. Página de rosto da edição de 1869 do livro de Darwin *On the origin of species by means of natural selection* (*A origem das espécies*).

Ao iniciar a viagem no Beagle, Darwin estava mais interessado em Geologia do que em Biologia. O primeiro volume do livro *Princípios de Geologia* do geólogo britânico Charles Lyell (1797-1875), que ele levou a bordo, trazia uma visão nova e cientificamente detalhada de como eventos geológicos haviam moldado a superfície do planeta. O que mais fascinou Darwin, no entanto, foi a possibilidade de as ideias de Lyell poderem ser testadas no mundo real.

O Beagle chegou à América do Sul no final de 1832 e, durante os três anos em que percorreu a costa do continente, Darwin passou a maior parte do tempo em terra, coletando todo tipo de animal e planta e registrando tudo o que encontrava. Em escavações perto de Punta Alta, na costa da Argentina, ele encontrou inúmeros fósseis de mamíferos já extintos, entre eles o de um animal de tamanho de um carro compacto e com organização esquelética semelhante à dos tatus que vivem hoje na América do Sul.

Após diversas paradas na costa do Chile, o Beagle seguiu para Galápagos, arquipélago do Oceano Pacífico cujas ilhas são pequenas e áridas, a cerca de 800 km da costa do Equador. Ali, Darwin encontrou uma fauna e uma flora que variavam ligeiramente de uma ilha para outra e que diferiam bastante da fauna e da flora da América do Sul. A natureza peculiar dos habitantes de Galápagos causou forte impressão no naturalista inglês, mas ele só percebeu sua importância quase dois anos depois da visita. (Fig. 5.5)


A
Roteiro percorrido pelo navio Beagle
Inglaterra
AMÉRICA DO NORTE
EUROPA
ÁSIA
TRÓPICO DE CÂNCER
Rota do Beagle
ÁFRICA
OCEANO PACÍFICO
EQUADOR
Ilhas Galápagos
0°
AMÉRICA DO SUL
OCEANO ÍNDICO
TRÓPICO DE CAPRICÓRNIO
OCEANIA
OCEANO PACÍFICO
OCEANO ATLÂNTICO
MERIDIANO DE GREENWICH
N
0
2.350 km
0°
B
Arquipélago de Galápagos
Marchena
N
Santiago
0
350 km
Baltra
Fernandina
São Cristóvão
Santa Cruz
Isabela
Floreana
C

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

PAULO MANZI

DIETER MBUS/CHROMORANGE/DIOMEDIA

Figura 5.5 A. As linhas vermelhas no mapa indicam o roteiro percorrido pelo navio britânico H. S. S. Beagle em sua viagem de cinco anos pelo mundo, de 7 de dezembro de 1831 a 2 de outubro de 1836. **B.** Conjunto de ilhas de Galápagos, localizado próximo à costa oeste da América do Sul, nas águas territoriais do Equador, um dos locais marcantes do roteiro do Beagle. **C.** Jabuti-gigante da espécie *Chelonoidis nigra*, que pode atingir 1,3 m de comprimento e 300 kg de massa corporal; um dos animais do arquipélago que chamaram a atenção de Darwin.

Alguns meses depois de voltar para a Inglaterra, ao rever anotações e submeter o material coletado à análise de diversos especialistas, Darwin compreendeu o significado de suas observações em Galápagos e em outros locais, convencendo-se da evolução biológica. No dia 10 de maio de 1837, cerca de sete meses após o retorno, ele começou a escrever o primeiro caderno de anotações sobre a transmutação das espécies, no qual registrou, em desenho, a ideia de parentesco evolutivo entre as espécies de seres vivos, ponto central de sua teoria.

Ao refletir sobre suas observações na viagem que realizou pelo mundo, Darwin se fez algumas perguntas básicas.

a) Se animais e plantas tivessem sido criados exatamente como se apresentam hoje, por que espécies distintas, mas nitidamente semelhantes, como de pássaros e de jabutis de Galápagos, foram colocadas pelo Criador apenas em ilhas próximas e não distribuídas homogeneamente pelo mundo?

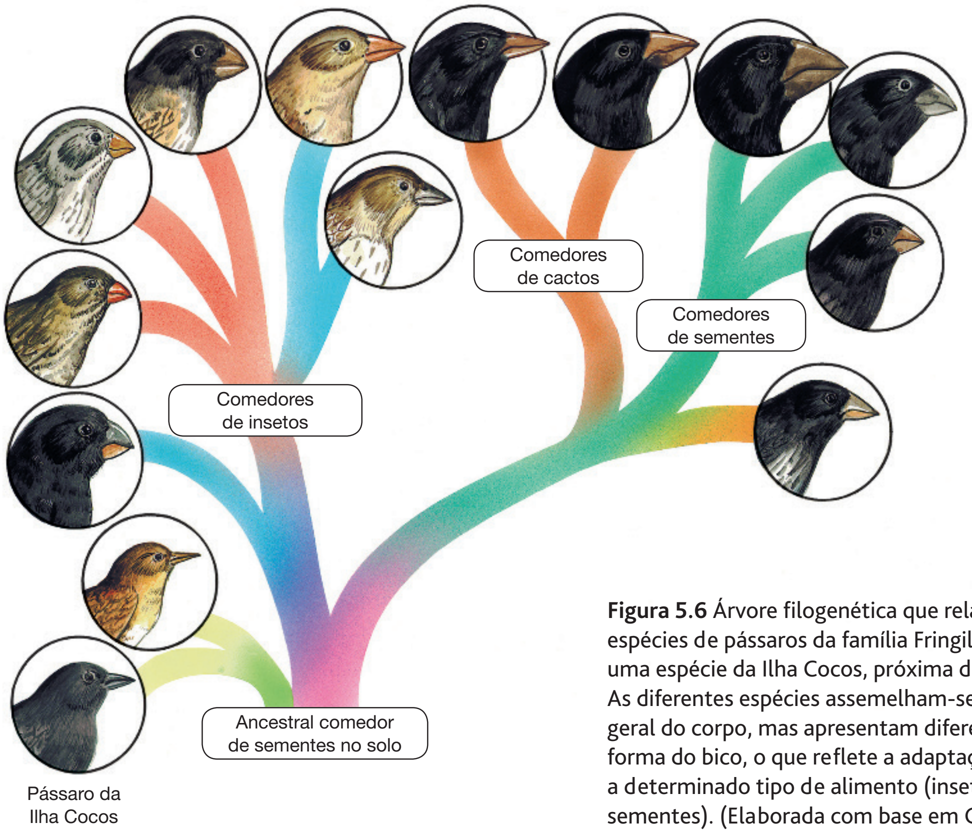
b) Por que ilhas com clima e condições físicas semelhantes, mas distantes entre si, como Galápagos e Cabo Verde, não tinham espécies semelhantes?

c) Por que fósseis se parecem com espécies que habitam atualmente os locais onde são descobertos?

A resposta encontrada por Darwin e que constituiu a base de sua teoria de evolução foi "descendência com modificação". Ele concluiu, entre outras coisas, que a semelhança entre a flora e a fauna de ilhas vizinhas deve-se ao fato de elas terem se originado das mesmas espécies ancestrais provenientes de continentes próximos. Em cada uma das ilhas, as populações colonizadoras sofreram adaptações específicas ao longo das gerações, dando origem a diferentes variedades ou espécies.

Estudos que utilizam técnicas de Biologia Molecular têm confirmado as hipóteses de Darwin. Hoje se sabe, por exemplo, que os jabutis-gigantes de Galápagos distribuem-se em onze espécies muito semelhantes entre si; a melhor explicação para essa semelhança é que todas se originaram de uma mesma espécie ancestral proveniente do continente americano.

As diversas espécies de pássaros da família Fringillidae de Galápagos, também muito semelhantes em termos genéticos, devem ter se originado de uma única espécie ancestral oriunda da América do Sul. Como no caso dos jabutis, a diversificação da espécie original de pássaro resultou da adaptação às condições particulares das diferentes ilhas, e foi essa diversificação que levou à formação de novas espécies. (Fig. 5.6)



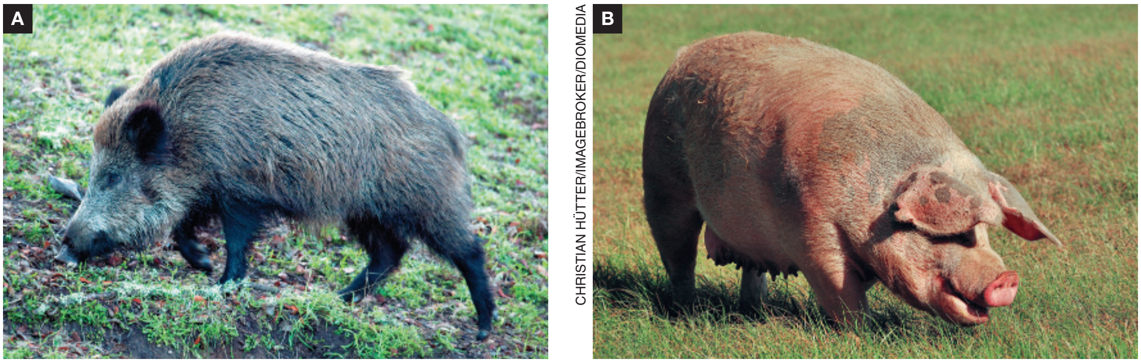
JURANDIR RIBEIRO

Figura 5.6 Árvore filogenética que relaciona treze espécies de pássaros da família Fringillidae de Galápagos e uma espécie da Ilha Cocos, próxima daquele arquipélago. As diferentes espécies assemelham-se quanto ao aspecto geral do corpo, mas apresentam diferenças marcantes na forma do bico, o que reflete a adaptação de cada espécie a determinado tipo de alimento (insetos, cactos ou sementes). (Elaborada com base em Grant, P. R., 1991.)

O conceito darwiniano de seleção natural

Darwin deduziu que a natureza exerce uma seleção sobre as espécies selvagens comparável à seleção realizada pelos agricultores para a obtenção das variedades domésticas.

Sabia-se, na época, que alguns animais domesticados e certos vegetais cultivados pertenciam a espécies com representantes ainda na condição selvagem. Comparando indivíduos resultantes do processo de domesticação com as formas selvagens, Darwin chamou a atenção para as enormes diferenças que podia haver entre eles; em certos casos, seria possível até mesmo classificá-los como espécies diferentes. (Fig. 5.7)



ROBERT PICKETT/VISUALS UNLIMITED/GLOW IMAGES

CHRISTIAN HÜTTER/IMAGEBROKER/DIOMEDIA

Figura 5.7 Exemplo dos efeitos da domesticação e da seleção praticada pelos criadores. **A.** *Sus scrofa*, porco-selvagem que atinge entre 1,2 e 1,8 m de comprimento, 90 cm de altura e entre 50 e 90 kg de massa corporal. **B.** Porco domesticado, que pode atingir comprimento e altura semelhantes aos do porco-selvagem e ter entre 200 e 300 kg de massa corporal. O porco-selvagem deu origem ao porco domesticado, e as diferenças entre eles resultam da ação dos criadores, que há muito tempo selecionam e cruzam os espécimes que apresentam características comercialmente desejáveis, entre as quais a maior massa corporal é um exemplo.

A **seleção artificial**, pela qual os agricultores e criadores produzem novas variedades de plantas e de animais, foi o principal argumento de Darwin contra a imutabilidade das espécies. Nesse processo, os criadores selecionam reprodutores de uma variedade ou de uma raça determinada, de seu interesse, permitindo que apenas os indivíduos dotados das características desejadas se reproduzam.

Uma comparação entre cães das diversas raças existentes ou entre as diversas variedades de couve (*Brassica oleracea*), por exemplo, leva à seguinte reflexão: se foi possível obter tantas diferenças em séculos, ou mesmo em poucos anos de seleção, imagine o que poderia ser conseguido em centenas, milhares ou milhões de anos! (Fig. 5.8)

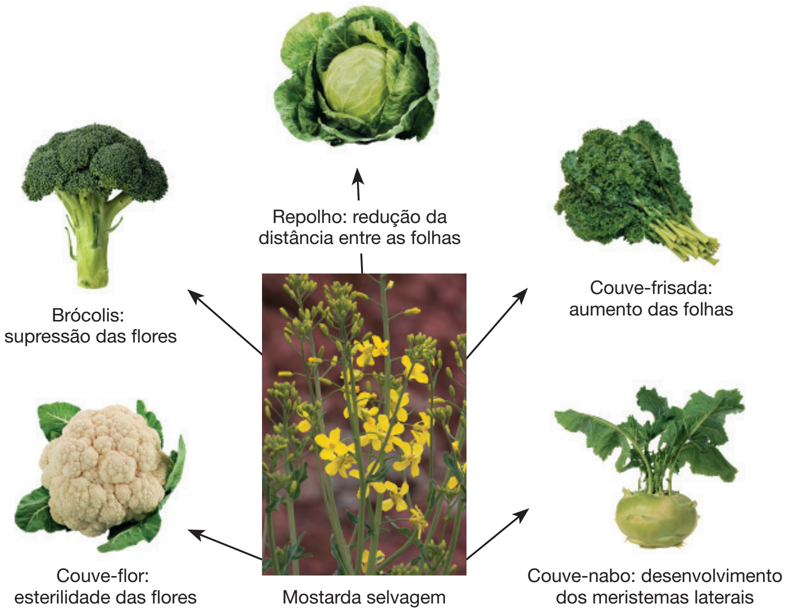

Repolho: redução da distância entre as folhas
Brócolis: supressão das flores
Couve-frisada: aumento das folhas
Couve-flor: esterilidade das flores
Mostarda selvagem
Couve-nabo: desenvolvimento dos meristemas laterais

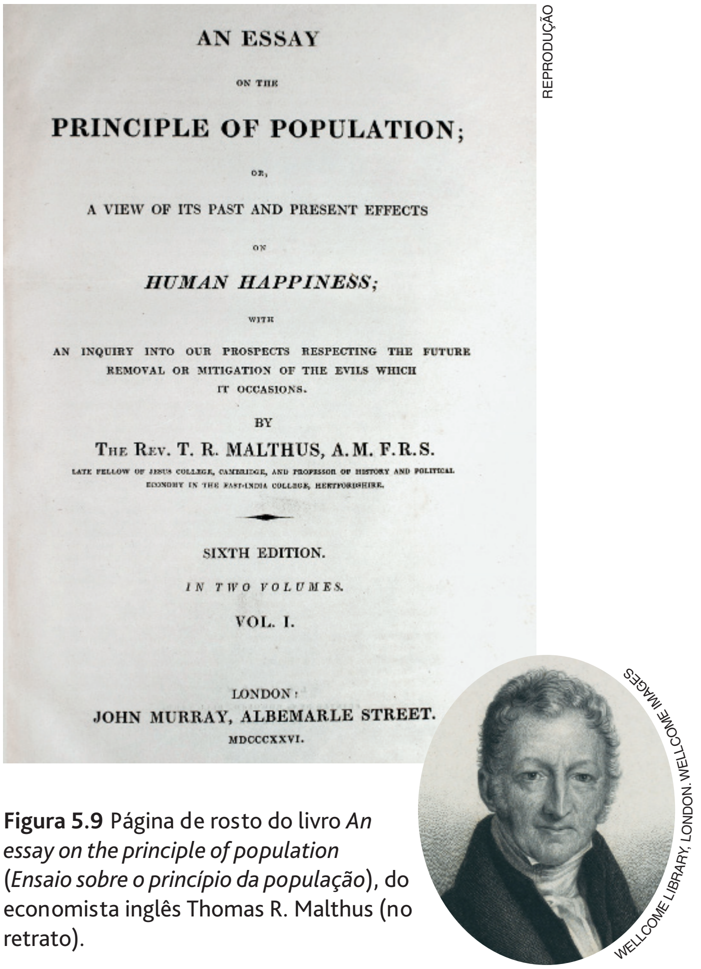
Figura 5.8 A seleção artificial feita por criadores de animais e por agricultores é responsável pelo surgimento de novas raças de animais ou variedades de plantas e serviu de argumento para as ideias de Darwin. Exemplos são os diversos tipos de vegetais obtidos por seleção artificial de uma variedade de *Brassica oleracea*, a mostarda selvagem.

FOTOS: MOSTARDA: BLICKWINKEL/ALAMY/GLOW IMAGES; COUVE-FLOR: EGOR RODYNCHENKO/SHUTTERSTOCK; BRÓCOLIS: DANNY SMYTHE/SHUTTERSTOCK; REPOLHO: PALOKHA TETIANA/SHUTTERSTOCK; COUVE-FRISADA: BINH THANH BUI/SHUTTERSTOCK; COUVE-NABO: JHY/SHUTTERSTOCK

A genialidade de Darwin foi ter percebido que a natureza podia exercer um papel de agente seletivo análogo ao dos agricultores e criadores de animais. Nas espécies selvagens, são “selecionados” os indivíduos que apresentam características vantajosas nas condições ambientais reinantes. Eles tendem a deixar proporcionalmente mais descendentes, que contribuem significativamente para a formação da geração seguinte. Em linhas gerais, é esse o conceito darwiniano de **seleção natural**.

Em sua obra, Darwin menciona o livro *An essay on the principle of population* (*Ensaio sobre o princípio da população*), do economista inglês Thomas R. Malthus (1766-1834). Nesse livro, Malthus sugere que o descompasso entre o crescimento das populações e a produção de alimentos é a principal causa da miséria humana. Para ele, o poder da terra em produzir meios de subsistência é muito menor que o poder do crescimento populacional, pois, se uma população não encontra obstáculos, ela cresce em progressão geométrica, mas os meios de subsistência aumentam em progressão aritmética. Malthus não se referia apenas às populações humanas, mas tentou imaginar a humanidade submetida às mesmas leis gerais que regem populações de outras espécies de seres vivos.

Alguns historiadores acreditam que a conclusão de Malthus despertou a atenção de Darwin para as ideias de “luta pela vida” e “sobrevivência dos mais aptos”, possivelmente contribuindo para a elaboração do conceito de seleção natural. (Fig. 5.9)



AN ESSAY

ON THE

PRINCIPLE OF POPULATION;

OR,

A VIEW OF ITS PAST AND PRESENT EFFECTS

ON

HUMAN HAPPINESS;

WITH

AN INQUIRY INTO OUR PROSPECTS RESPECTING THE FUTURE
REMOVAL OR MITIGATION OF THE EVILS WHICH
IT OCCASIONS.

BY

THE REV. T. R. MALTHUS, A.M. F.R.S.
LATE FELLOW OF JESUS COLLEGE, CAMBRIDGE, AND PROFESSOR OF HISTORY AND POLITICAL
ECONOMY IN THE EAST-INDIA COLLEGE, HERTFORDSHIRE.

SIXTH EDITION.

IN TWO VOLUMES.

VOL. I.

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
MDCCCXXVI.

REPRODUÇÃO

WELLCOME LIBRARY, LONDON. WELLCOME IMAGES

Figura 5.9 Página de rosto do livro *An essay on the principle of population* (*Ensaio sobre o princípio da população*), do economista inglês Thomas R. Malthus (no retrato).

Acompanhe, a seguir, como Darwin, a partir de alguns fatos observados na natureza, chegou a três proposições que fundamentam o conceito de seleção natural.

- **Fato 1**. As populações naturais de todas as espécies tendem a crescer rapidamente, uma vez que o potencial reprodutivo dos seres vivos é muito grande. Isso pode ser verificado, por exemplo, quando determinadas espécies são criadas em cativeiro, quando se garantem condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento. Nesses casos, sempre se observa uma elevada capacidade reprodutiva, inerente a praticamente todas as populações biológicas.
- **Fato 2**. Os tamanhos das populações naturais, a despeito do grande potencial para crescer, mantêm-se relativamente constantes ao longo do tempo; isso ocorre porque diversos fatores ambientais – disponibilidade de alimento, locais para procriação, presença de inimigos naturais, parasitas etc. – exercem efeito limitador ao crescimento.

  Inferência 1 – Na natureza, a cada geração, morre grande número de indivíduos, muitos dos quais, provavelmente, sem deixar descendentes.
- **Fato 3**. Os indivíduos de uma população diferem quanto a diversas características, inclusive aquelas que influem na capacidade de explorar com sucesso os recursos naturais e de deixar descendentes.

  Inferência 2 – Os indivíduos que sobrevivem e se reproduzem, a cada geração, são preferencialmente os que possuem determinadas características relacionadas à adaptação às condições ambientais.
- **Fato 4**. Grande parte das características apresentadas por uma geração é herdada dos pais.

  Inferência 3 – Uma vez que, a cada geração, sobrevivem preferencialmente os mais adaptados, eles tendem a transmitir aos descendentes as características relacionadas a essa maior aptidão para sobreviver e se reproduzir.

Assim, ao longo de gerações sucessivas, a seleção natural favorece a permanência e o aprimoramento de características relacionadas à adaptação da espécie a seu ambiente.

A essência do darwinismo

O **darwinismo**, como é conhecida a teoria evolucionista baseada em pressupostos da teoria original de Darwin, defende a ideia da ancestralidade comum, ou seja, que todos os seres vivos, em algum momento no passado, compartilharam um mesmo ancestral. Por exemplo, entre 7 e 8 milhões de anos atrás teria vivido uma linhagem de primata que originou, por um lado, a linhagem dos chimpanzés e, por outro, a linhagem humana.

Outra ideia central do pensamento darwiniano é a seleção natural, segundo a qual os indivíduos de cada espécie mais bem adaptados ao ambiente sobrevivem e têm maior sucesso reprodutivo.

Esses princípios fundamentais da teoria evolucionista de Darwin têm sido confirmados pela ciência contemporânea e ampliados pelas modernas descobertas científicas, servindo de base para a elaboração da teoria evolucionista atualmente aceita, que estudaremos adiante.

Em 1844, Darwin concluiu seu mais longo trabalho sobre a origem das espécies e a seleção natural. Não o publicou, porém, receoso de que suas ideias não fossem bem aceitas, em virtude do teor um tanto revolucionário. Amigos de Darwin, conhecedores da seriedade de seu trabalho, tentavam convencê-lo a publicar o manuscrito antes que outros divulgassem ideias semelhantes, mas ele resistia. Finalmente, em junho de 1858, Darwin recebeu do naturalista inglês Alfred Russel Wallace (1823-1913) uma carta acompanhada de um manuscrito. Ao estudar as faunas da Amazônia e das Índias Orientais (denominação dada, na época, a regiões atualmente correspondentes à Índia e a outros países orientais), Wallace havia concluído que as espécies se modificam por seleção natural. (Fig. 5.10)

Assombrado com as semelhanças entre seu trabalho e o de Wallace, Darwin se dispôs a escrever um resumo de suas ideias, apresentando-o, com as de Wallace, em uma reunião da Linnean Society of London em 1º de julho de 1858. Um ano mais tarde, ele publicou o trabalho completo no livro que se tornou conhecido como *A origem das espécies*. Anotações confirmam que Darwin concebeu sua teoria de evolução aproximadamente 15 anos antes de receber a carta de Wallace; este admitiu publicamente o pioneirismo do colega.

A obra *A origem das espécies* gerou grandes debates e consolidou o nome de Charles Darwin como o principal autor da teoria da evolução pela seleção natural.

SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

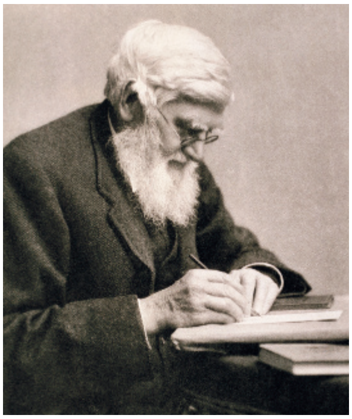


Figura 5.10 Retrato de Alfred Russel Wallace, naturalista inglês que concebeu, independentemente de Darwin, uma teoria de evolução baseada na seleção natural.

Além do contexto histórico do evolucionismo, outro ponto importante refere-se às evidências da evolução biológica. Explore esse assunto com os estudantes, desafiando-os a dar outras explicações, que não as evolucionistas, para as evidências apresentadas.

5.2 Evidências da evolução biológica

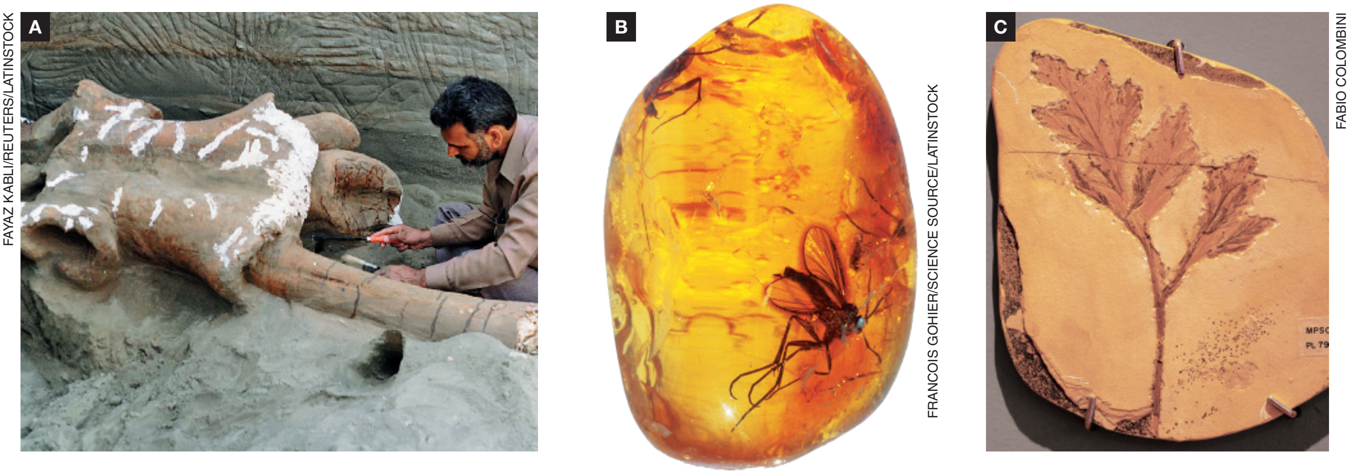
Pesquisas em diferentes áreas da Biologia continuam a fornecer evidências a favor da evolução biológica. Entre as principais, destacam-se: o documentário fóssil; as semelhanças embrionárias, anatômicas, fisiológicas e genéticas entre as espécies; a adaptação dos seres vivos a seus ambientes. A seguir, acompanhe mais detalhadamente o significado de cada um desses tipos de evidência.

O documentário fóssil como evidência da evolução biológica

Pode ser interessante discutir com os alunos casos de contrabando de fósseis brasileiros para colecionadores, museus e *sites* de venda no exterior e as implicações dessa ação (perda de informação disponível para estudos, perda de fósseis devido ao transporte e preservação inadequados etc.)

Em condições normais, logo que um organismo morre, entram em ação agentes saprófagos, que destroem completamente o cadáver. Entretanto, no passado ocorreram momentos em que as condições foram extremamente favoráveis à preservação do cadáver ou do vestígio deixado por um organismo. Assim se originam os **fósseis** (do latim *fossilis*, tirado da terra), vestígios deixados por seres que viveram no passado e que revelam semelhanças e diferenças com os seres atuais.

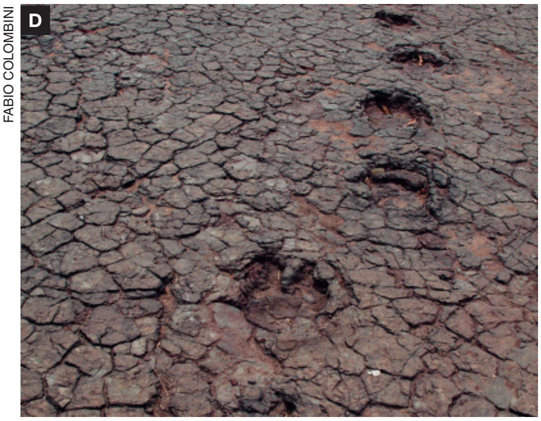
Os vestígios fósseis podem ser ossos, dentes, pegadas impressas em rochas, fezes petrificadas, animais conservados no gelo, troncos de árvores petrificados etc. O estudo dos fósseis permite deduzir, entre outras coisas, o tamanho e a forma dos organismos que os deixaram, possibilitando a reconstituição de imagens mentais, provavelmente bem aproximadas, desses organismos quando vivos. Os fósseis constituem a mais forte evidência de que nosso planeta foi habitado, no passado, por seres bem diferentes dos que vivem atualmente. A comparação entre os fósseis e os seres atuais permite estabelecer correlações que fortalecem a teoria da evolução das espécies. (Fig. 5.11)



FAYAZ KABLI/REUTERS/LATINSTOCK

FRANCOIS GOHIER/SCIENCE SOURCE/LATINSTOCK

FABIO COLOMBINI

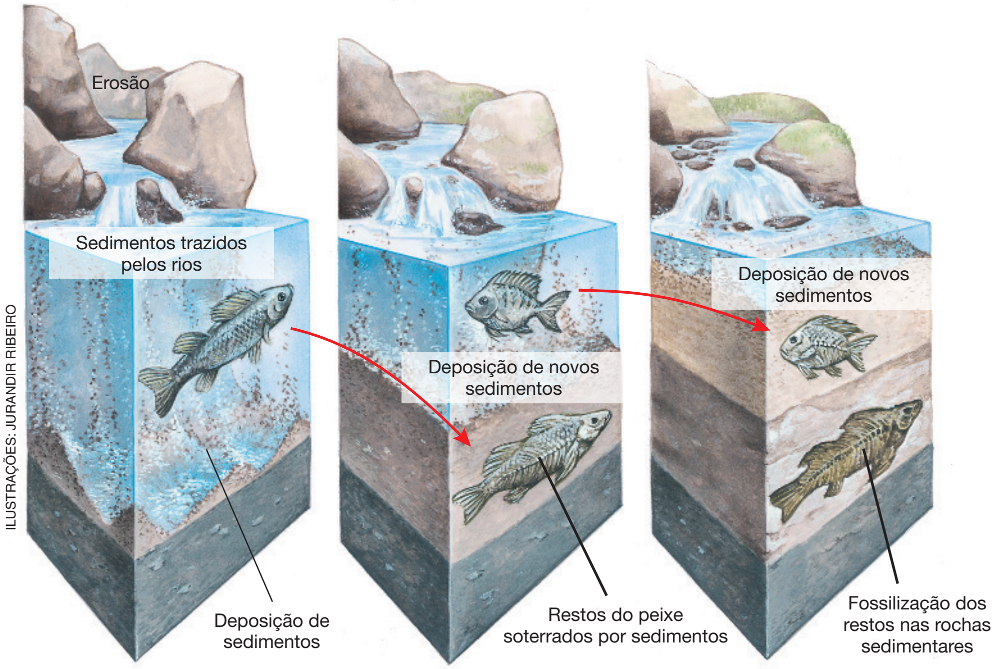


FABIO COLOMBINI

Figura 5.11 A. Paleontólogo escava esqueleto de ancestral de elefante com idade estimada em 50 mil anos, na Índia, em 2000. **B.** Pedaço de âmbar com 45 milhões de anos, contendo insetos. **C.** Fóssil da pteridófita *Anemia* sp., do período Cretáceo, com cerca de 100 milhões de anos de idade (Chapada do Araripe, Ceará, 2012). Esse fóssil mede cerca de 12 cm de comprimento. **D.** Pegadas fossilizadas de dinossauro *Iguanodonte mantelli* em lama petrificada. (Vale dos Dinossauros, Sousa, PB.) Esse dinossauro media cerca de 9 m de comprimento.

Tipos de fossilização

A **fossilização**, como se denomina o processo de formação de um fóssil, ocorre apenas em condições extremamente favoráveis, por exemplo, quando o vestígio ou o cadáver de um organismo é rapidamente sepultado por sedimentos como areia, argila etc., geralmente em ambientes alagados. Com o passar do tempo, os sedimentos depositados compactam-se e originam o que os geólogos denominam **rocha sedimentar**. Se no sedimento houver vestígios do organismo morto, eles podem ser preservados na rocha, vindo a constituir os diferentes tipos de fóssil. (Fig. 5.12)

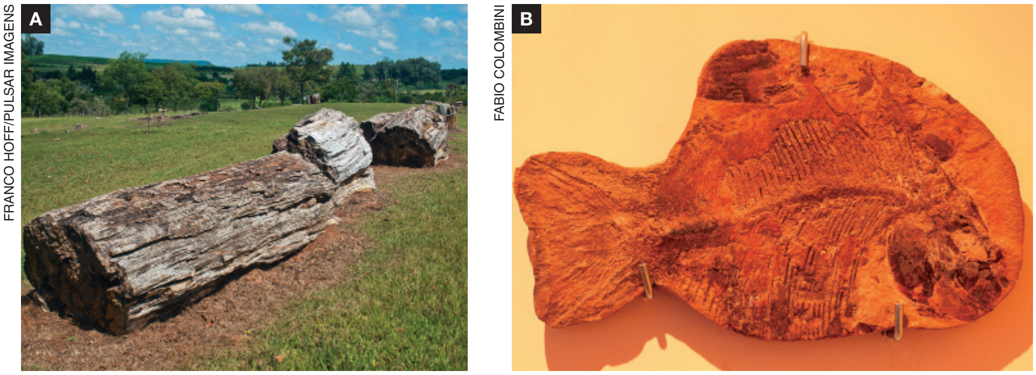

Erosão
Sedimentos trazidos pelos rios
Deposição de sedimentos
Deposição de novos sedimentos
Restos do peixe soterrados por sedimentos
Deposição de novos sedimentos
Fossilização dos restos nas rochas sedimentares

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Figura 5.12 Representação esquemática da formação de um fóssil em um estuário de rio. Os sedimentos trazidos depositam-se sobre um animal morto, preservando-o da decomposição. Como as rochas sedimentares se formam em camadas sobrepostas, fósseis encontrados em camadas mais profundas são mais antigos que os das camadas mais superficiais. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Um tipo de fóssil, conhecido como **molde**, forma-se quando os restos soterrados de organismos, depois de deixarem sua impressão gravada na rocha, desaparecem completamente. Em certos casos, o molde deixado por um organismo na rocha pode ser preenchido por outros minerais, que, ao se solidificarem, produzem uma cópia tridimensional, em rocha, do organismo original. Esse tipo de fóssil é o **contramolde**.

Em certos casos, as substâncias orgânicas do cadáver ou de vestígios sepultados são lenta e gradualmente substituídas por minerais trazidos pela água. Aos poucos, os minerais ocupam o lugar das substâncias orgânicas; a substituição pode ser tão exata que todos os detalhes do corpo do organismo ficam preservados como rocha, embora não reste nada mais do material orgânico original. Esse processo de fossilização, chamado **permineralização** ou **petrificação**, ocorreu em diversos lugares do planeta, como em certas regiões do Rio Grande do Sul, onde há troncos petrificados de árvores que viveram há dezenas de milhões de anos. Na Chapada do Araripe, na divisa do estado do Ceará com os estados de Pernambuco, Paraíba e Piauí, há depósitos fossilíferos do período Cretáceo, entre 145 e 66 milhões de anos atrás, com peixes e répteis petrificados e moldes de plantas e de insetos. (Fig. 5.13)



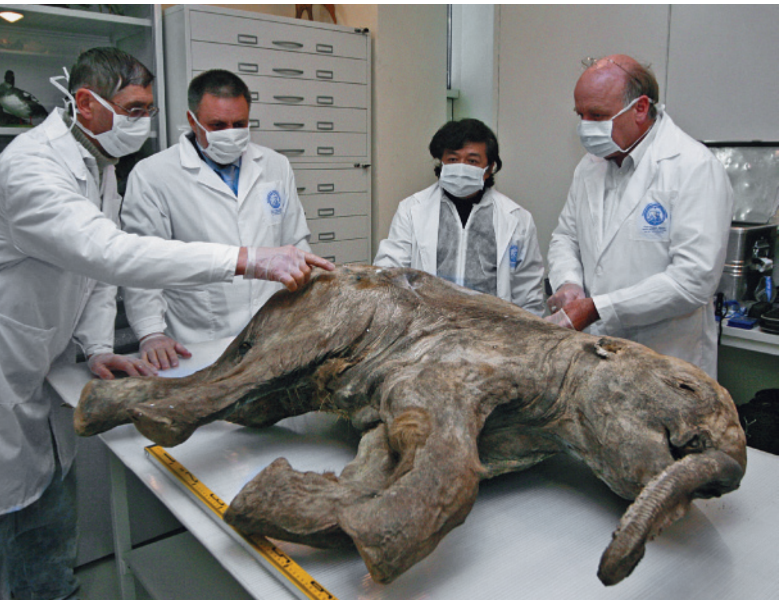
FRANCO HOFF/PULSAR IMAGENS

FABIO COLOMBINI

Figura 5.13 **A.** Tronco fossilizado com mais de 200 milhões de anos, encontrado na cidade de Mata (RS). **B.** Fóssil de peixe extinto da espécie *Araripichthys castilho*, que viveu há aproximadamente 110 milhões de anos na Chapada do Araripe. Esse peixe media cerca de 25 cm de comprimento.

Outro tipo de fóssil são pegadas e marcas deixadas por um organismo sobre um terreno mole que posteriormente se transformou em rocha. Esses vestígios fósseis, denominados **impressões**, podem fornecer informações importantes sobre o organismo que as produziu. Por exemplo, em 1978, a cientista inglesa Mary Leakey (1913-1996) encontrou, na Tanzânia (África), pegadas de dois hominídeos primitivos, presumivelmente um macho e uma fêmea, caminhando lado a lado. Os estudos mostraram que a rocha onde estava registrado o passeio desses nossos parentes distantes tinha nada menos que 3,5 milhões de anos de idade. Podemos concluir que, naquela época, os possíveis ancestrais da espécie humana já caminhavam eretos, um traço que nos distingue dos outros primatas atuais.

Em alguns casos mais raros, ocorreu preservação total do organismo fossilizado. Por exemplo, insetos de dezenas de milhões de anos foram encontrados no interior de resina vegetal fossilizada, chamada **âmbar fóssil**. Talvez o caso mais espetacular de preservação de organismos fósseis sejam os corpos completos de mamutes descobertos sob as geleiras do Ártico. Esses enormes mamíferos peludos, semelhantes aos elefantes atuais, foram preservados pelo gelo e datados em mais de 30 mil anos de idade. (Fig. 5.14)



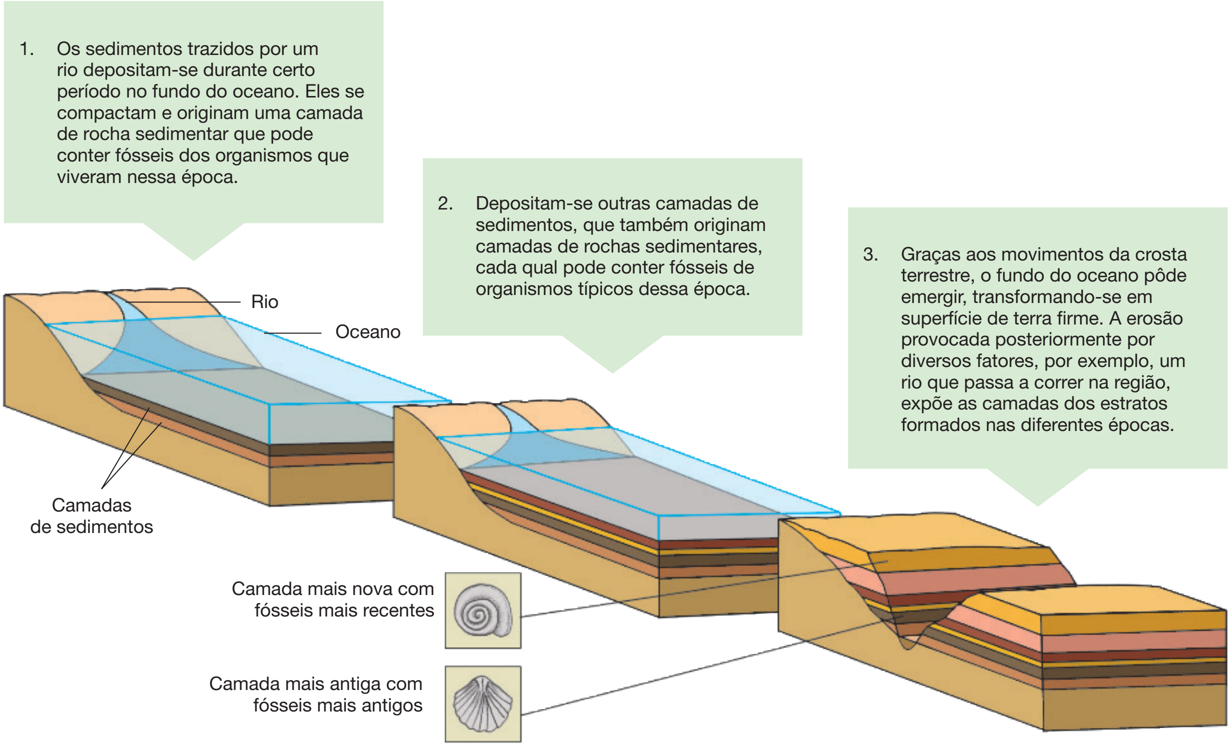
SOVFOTO/UIG/GETTY IMAGES

Figura 5.14 Corpo de filhote de mamute que viveu há aproximadamente 40 mil anos, na Sibéria, e foi preservado pelo gelo.

Determinação da idade dos fósseis

Um dos grandes desafios da ciência foi estabelecer métodos para descobrir há quanto tempo se formou um fóssil ou a rocha que o contém. O primeiro método para datar fósseis foi a **datação relativa**, desenvolvido no século XIX com base nas ideias do geólogo inglês William Smith (1769-1839). Partindo do princípio de que as rochas sedimentares sempre se formam no fundo de mares e de lagos pela deposição sucessiva de camadas de sedimentos, Smith concluiu que as camadas localizadas em posições mais inferiores na pilha sedimentar deviam ter-se formado antes das superiores. Com isso, foi possível determinar as idades relativas das camadas de rocha e dos fósseis nelas contidos, sabendo quais delas são mais antigas e quais são mais recentes. Smith também observou que alguns fósseis são como “marcas registradas” das rochas em que ocorrem. Em outras palavras, eles são encontrados apenas (ou quase exclusivamente) naquele tipo de rocha. Fósseis típicos de certas camadas sedimentares foram denominados **fósseis-guias**.

Os trabalhos de Smith revolucionaram a prática da Geologia, permitindo que rochas de diferentes regiões do mundo pudessem ser comparadas com base nos fósseis-guias nelas contidos. Com isso, os cientistas conseguiram reunir “fragmentos” do documentário fóssil de diversas regiões do planeta e, com sua datação relativa, estabelecer as divisões do tempo geológico, como veremos no próximo capítulo. (Fig. 5.15)



1. Os sedimentos trazidos por um rio depositam-se durante certo período no fundo do oceano. Eles se compactam e originam uma camada de rocha sedimentar que pode conter fósseis dos organismos que viveram nessa época.
2. Depositam-se outras camadas de sedimentos, que também originam camadas de rochas sedimentares, cada qual pode conter fósseis de organismos típicos dessa época.
3. Graças aos movimentos da crosta terrestre, o fundo do oceano pôde emergir, transformando-se em superfície de terra firme. A erosão provocada posteriormente por diversos fatores, por exemplo, um rio que passa a correr na região, expõe as camadas dos estratos formados nas diferentes épocas.

Rio
Oceano
Camadas de sedimentos
Camada mais nova com fósseis mais recentes
Camada mais antiga com fósseis mais antigos

ILUSTRAÇÃO: PAULO MANZI

Figura 5.15 Representação esquemática da formação de rochas sedimentares e de fósseis em diferentes períodos de tempo. Cada estrato, ou camada, representa uma etapa da história da Terra e é caracterizado por fósseis de certos organismos (fósseis-guias) que viveram na época correspondente. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) (Elaborada com base em Campbell, N. e cols., 1999.)

Certifique-se de que os estudantes compreendem o processo de formação das rochas sedimentares e que dominam a ideia de que fósseis encontrados nas camadas mais profundas de um empilhamento sedimentar são mais antigos que os encontrados nas camadas superiores. Os conhecimentos de Química e Matemática poderiam contribuir para responder às questões relacionadas ao decaimento radioativo e à aplicação na datação de rochas e de fósseis.

Em meados do século XX, a datação dos fósseis e das camadas da Terra teve grande avanço, com o desenvolvimento de métodos fundamentados na análise de elementos radioativos. A técnica, denominada **datação radiométrica** ou **datação absoluta**, permite estabelecer com certa precisão há quanto tempo um fóssil ou uma rocha se formou.

A datação radiométrica baseia-se nos conhecimentos científicos sobre os isótopos radioativos de certos elementos químicos. Isótopos são átomos de mesma natureza química, com o mesmo número de prótons no núcleo atômico, mas com diferente número de nêutrons, o que lhes confere diferentes massas atômicas e, em certos casos, propriedades radioativas. As propriedades radioativas de um isótopo resultam do chamado **decaimento radioativo**, que é sua transformação em outro isótopo ou em outro elemento químico.

Por exemplo, a forma mais comum na natureza de átomos de carbono é o isótopo ^{12}C, que possui 6 prótons e 6 nêutrons no núcleo atômico; esse isótopo tem, portanto, número de massa igual a 12 (6p + 6n). Uma pequena porcentagem dos átomos de carbono, entretanto, encontra-se na forma do isótopo radioativo ^{14}C, que possui 6 prótons e 8 nêutrons, com número de massa igual a 14. Com o tempo, um dos nêutrons do carbono-14 tende a se transformar em próton; com isso, o isótopo ^{14}C decai para nitrogênio-14 (^{14}N), cujo núcleo possui 7 prótons e 7 nêutrons.

Os físicos mostraram que, a cada período de 5.730 anos, aproximadamente metade dos átomos de ^{14}C de uma amostra decai para ^{14}N. Assim, se partíssemos de uma amostra com 1.000 átomos de ^{14}C, após 5.730 anos teríamos 500 átomos de ^{14}C e 500 de ^{14}N; passados mais 5.730 anos, teríamos cerca de 250 átomos de ^{14}C e 750 de ^{14}N; e assim por diante.

O tempo necessário para metade dos isótopos radioativos de um elemento químico se transformar em outro isótopo ou em outro elemento químico é denominado **meia-vida**. No caso do ^{14}C, a meia-vida é de 5.730 anos, como já mencionamos. Por ocorrer em uma taxa constante (meia-vida), típica de cada isótopo, o decaimento radioativo constitui uma espécie de "relógio geológico" e pode ser utilizado para determinar a idade de rochas e de fósseis.

A datação pelo método do carbono-14 baseia-se na comparação entre as quantidades de ^{14}C e de ^{12}C presentes em uma amostra de matéria orgânica fóssil. O método fundamenta-se no fato de que a taxa de ^{14}C se mantém relativamente constante na atmosfera, tanto no passado quanto hoje. Isso porque o bombardeamento de átomos de nitrogênio atmosférico por raios cósmicos leva à formação contínua de ^{14}C, situação que se supõe inalterada há milhões de anos.

Como os organismos fotossintetizantes não têm preferência por incorporar um ou outro desses isótopos de carbono, há nas moléculas orgânicas dos seres vivos a mesma proporção entre os dois isótopos de carbono presentes na atmosfera. Ao morrer, porém, o organismo deixa de incorporar novos átomos de carbono e o ^{14}C presente em sua matéria constituinte pouco a pouco se transforma em nitrogênio, em decorrência do decaimento radioativo. Por isso, a quantidade residual do ^{14}C nas moléculas orgânicas presentes em um fóssil possibilita sua datação. Por exemplo, se um fóssil apresenta $\frac{1}{16}\left(\text{ou } \frac{1}{2} \text{ elevado a 4}\right)$ do ^{14}C que existia no organismo quando vivo, pode-se concluir que sua morte ocorreu há aproximadamente 23 mil anos ($4 \times 5.730 = 22.920$). (Fig. 5.16)

Como a meia-vida do carbono-14 é relativamente curta, a datação por meio desse isótopo é possível apenas para fósseis com idade inferior a 50 mil anos. Para datar fósseis mais antigos, são usados isótopos com meia-vida mais longa, presentes em rochas nas quais o fóssil se encontra. Nesses casos, em vez de se datar diretamente o fóssil, estima-se a idade das rochas que o contêm. Entre os diversos isótopos utilizados na datação radiométrica de rochas, destacam-se: o potássio-40, com meia-vida de 1,26 bilhão de anos, que decai para argônio-40; o urânio-235, com meia-vida de 704 milhões de anos, que decai para chumbo-207; o alumínio-26, com meia-vida de 740 mil anos, que decai para magnésio-26.

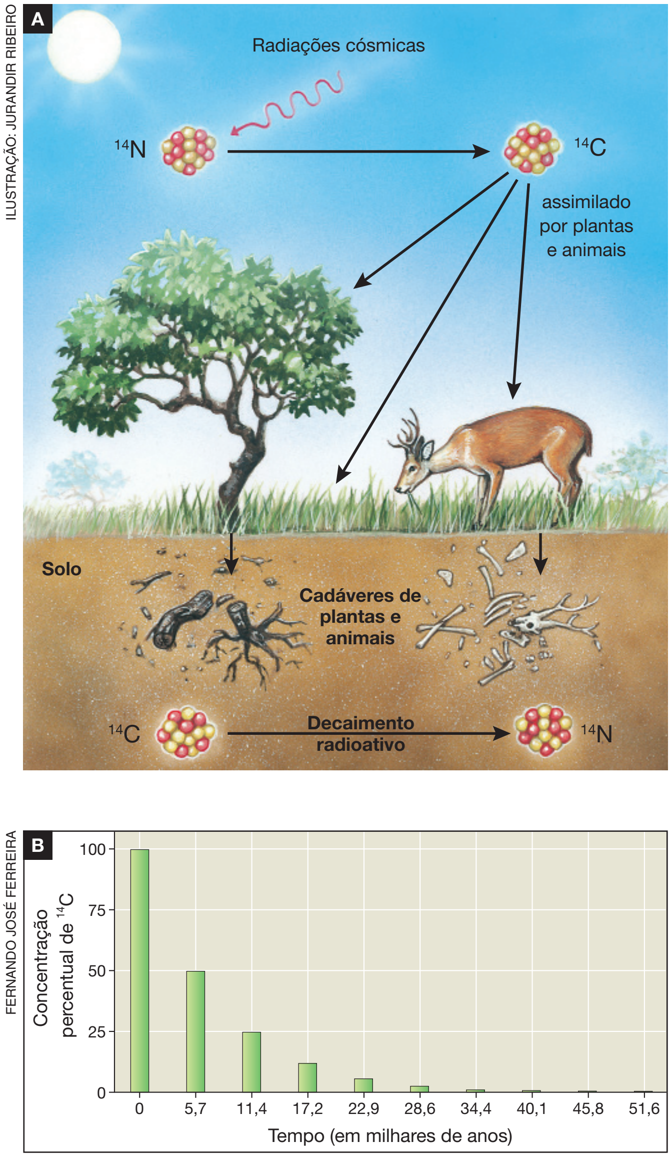


ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

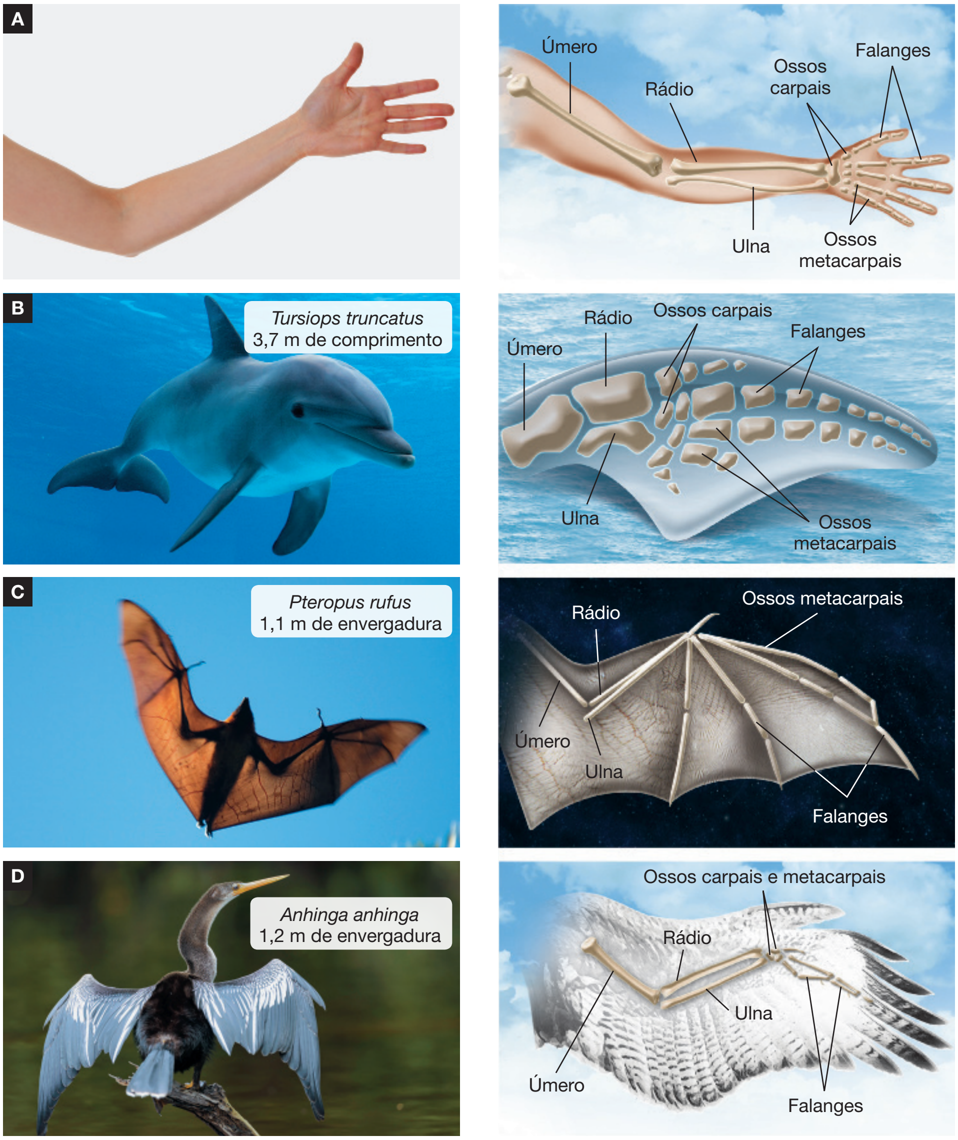
FERNANDO JOSÉ FERREIRA

A
Radiações cósmicas
14N
14C
assimilado por plantas e animais
Solo
Cadáveres de plantas e animais
14C
Decaimento radioativo
14N
B
Concentração percentual de 14C
100
75
50
25
0
0
5,7
11,4
17,2
22,9
28,6
34,4
40,1
45,8
51,6
Tempo (em milhares de anos)

Figura 5.16 A. Representação esquemática da formação de ^{14}C a partir de ^{14}N bombardeado por raios cósmicos. O ^{14}C é assimilado pelos seres vivos. Após a morte, o ^{14}C presente em seus restos decai a ^{14}N. Medidas do ^{14}C residual permitem estimar há quanto tempo o organismo morreu. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) **B.** O gráfico mostra o decaimento do ^{14}C, cuja meia-vida é de 5.730 anos. (Elaborados com base em Campbell, N. e cols., 1999.)

Anatomia Comparada como evidência da evolução biológica

Observe a figura a seguir, que mostra a organização esquelética dos membros anteriores de quatro animais vertebrados: ser humano, golfinho, morcego e ave. (Fig. 5.17)


A
Úmero
Rádio
Ossos carpais
Falanges
Ulna
Ossos metacarpais
B
Tursiops truncatus
3,7 m de comprimento
Rádio
Ossos carpais
Falanges
Úmero
Ulna
Ossos metacarpais
C
Pteropus rufus
1,1 m de envergadura
Rádio
Ossos metacarpais
Úmero
Ulna
Falanges
D
Anhinga anhinga
1,2 m de envergadura
Ossos carpais e metacarpais
Rádio
Ulna
Úmero
Falanges

PIOTR MARCINSKI/SHUTTERSTOCK

AUGUSTO LEANDRO STANZANI/ARDEA/DIOMEDIA

IMAGE SOURCE/CULTURA/GLOW IMAGES

MARCOS AMEND/PULSAR IMAGENS

ILUSTRAÇÕES: ERIKA ONODERA

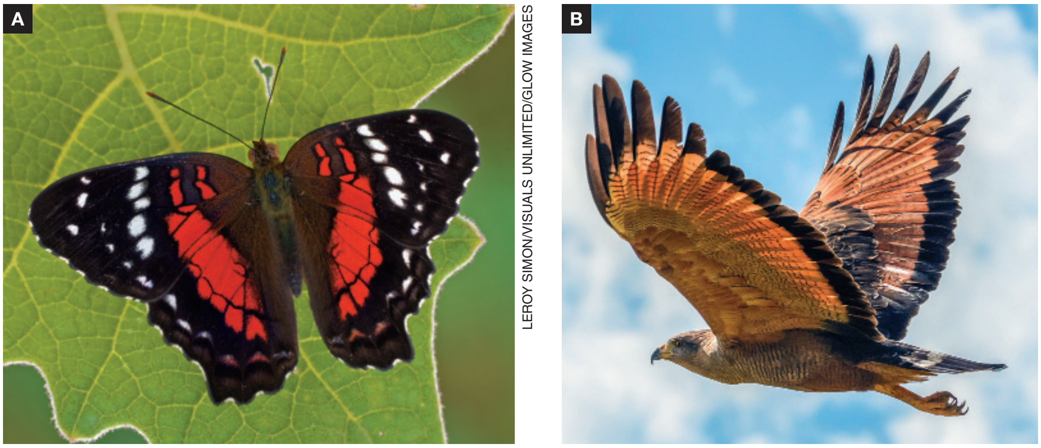
Figura 5.17 Fotos e representação esquemática comparando os esqueletos dos membros anteriores de alguns vertebrados: **A.** braço, antebraço e mão humanos, **B.** nadadeira de golfinho, **C.** asa de morcego; **D.** asa de ave. Note as semelhanças dos ossos nas diferentes espécies. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Os membros anteriores desses animais são anatomicamente diferentes e desempenham funções distintas, mas possuem o mesmo plano de organização esquelética, tanto que é possível estabelecer uma correspondência exata entre seus diversos ossos. Além disso, no estudo do desenvolvimento embrionário desses animais, observa-se que os membros anteriores, bem como diversas outras estruturas corporais, se desenvolvem de modo muito semelhante nas diferentes espécies; a diferenciação acentua-se gradualmente, à medida que o desenvolvimento progride. A pergunta-chave sobre essas “coincidências” é: por que partes e órgãos corporais, embora anatômica e funcionalmente diferentes, se desenvolvem de modo tão semelhante em espécies distintas de seres vivos?

O evolucionismo explica as semelhanças embrionárias, anatômicas e fisiológicas entre animais pela ascendência comum que eles tiveram no passado remoto. Os três primeiros animais exemplificados na figura 5.17 são mamíferos e descendem do ancestral de todos os mamíferos, o que explica suas semelhanças. Em épocas bem mais antigas, as aves tiveram um ancestral comum com os mamíferos – uma espécie de réptil –, do qual todos esses animais herdaram o padrão de estrutura corporal. Durante a evolução de cada grupo, o processo de adaptação por seleção natural levou a mudanças na anatomia e na função do membro, mas o padrão básico herdado do ancestral reptiliano foi conservado.

Estruturas corporais que se desenvolvem de modo semelhante em embriões de diferentes espécies, como os esqueletos dos membros anteriores dos animais que acabamos de mencionar, são denominadas **órgãos homólogos**.

Ao contrário, há estruturas corporais presentes em diferentes espécies que desempenham funções semelhantes, mas têm origens embrionárias totalmentes distintas; tais estruturas são denominadas **órgãos análogos**. É o caso das asas de aves e de insetos; ambas são adaptadas ao voo, mas têm origens embrionárias completamente diversas: nas aves, as asas são estruturas dotadas de ossos e músculos, enquanto nos insetos elas são expansões da epiderme corporal; os músculos de voo dos insetos estão dentro do tórax. (Fig. 5.18)



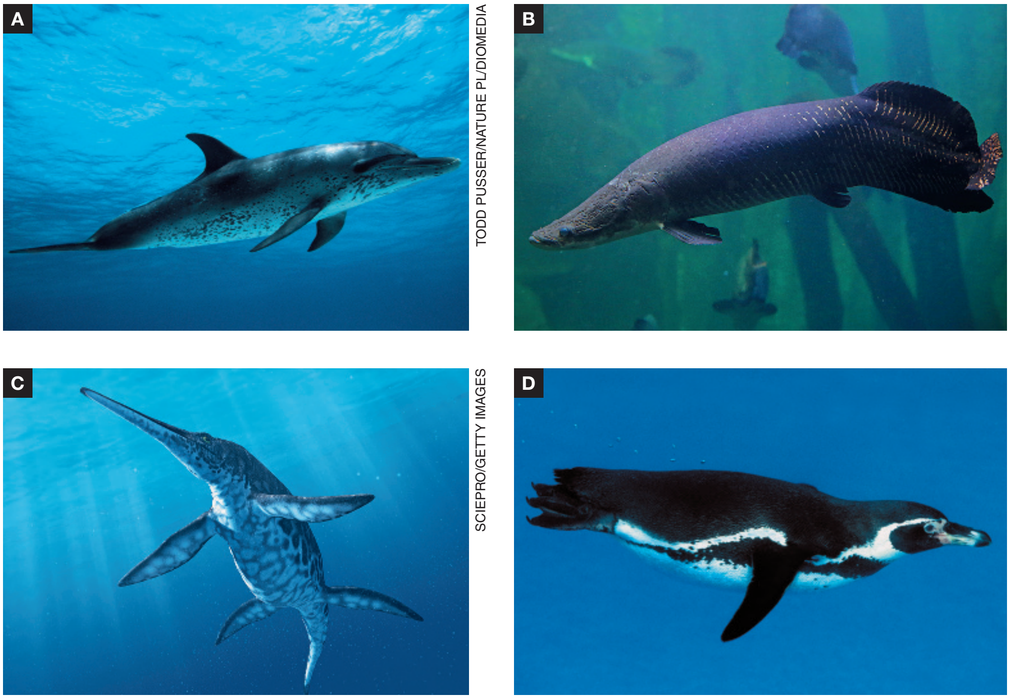
LEROY SIMON/VISUALS UNLIMITED/GLOW IMAGES

MARCOS AMEND/PULSAR IMAGENS

Figura 5.18 As asas dos insetos e as das aves são órgãos análogos: têm a mesma função, mas origem embrionária e plano estrutural diferentes. **A.** Borboleta *Anartia amathea*, que tem 4 cm de envergadura. **B.** Gavião--caboclo (*Heterospizias meridionalis*), que mede cerca de 55 cm de comprimento.

De acordo com a teoria evolucionista, as funções eventualmente diferentes desempenhadas por órgãos homólogos devem-se à diversificação ocorrida ao longo da evolução; nesse processo, cada espécie incorporou e desenvolveu características adaptativas ao seu modo de vida particular. Essa diversificação evolutiva de estruturas homólogas, decorrente da adaptação a modos de vida diferentes, constitui o que os biólogos evolucionistas denominam **divergência evolutiva**.

Órgãos análogos são estruturas que apareceram de maneira independente na evolução de diferentes grupos de organismos, constituindo adaptações a modos de vida semelhantes. A adaptação evolutiva pode levar organismos pouco aparentados a desenvolver estruturas e formas corporais semelhantes, devido a “pressões” adaptativas similares, processo conhecido como **convergência evolutiva**. (Fig. 5.19)



TODD PUSSER/NATURE PL/DIOMEDIA

FABIO COLOMBINI

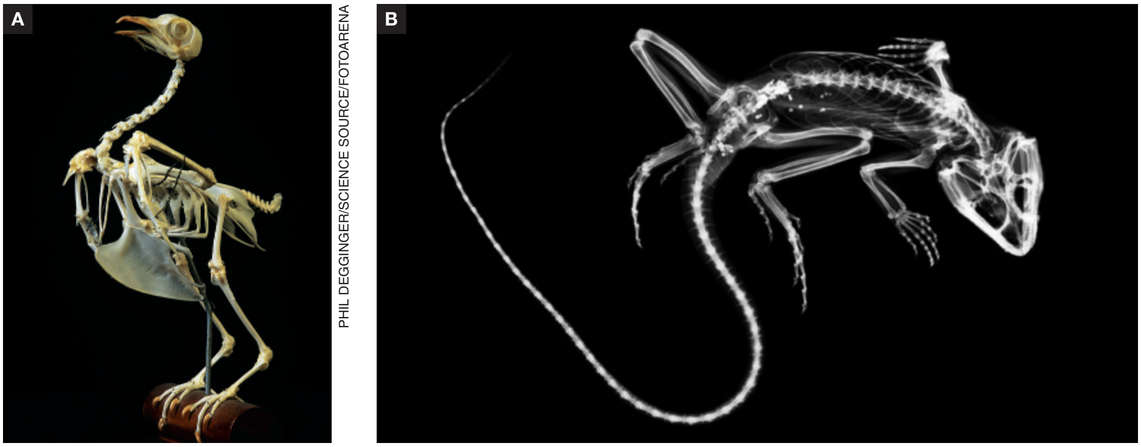
SCIEPRO/GETTY IMAGES

GERARD LACZ/VISUALS UNLIMITED, INC./ GLOW IMAGES

Figura 5.19 Exemplo de convergência evolutiva: a forma hidrodinâmica do corpo desenvolveu-se independentemente em diferentes espécies de vertebrados devido à sua adaptação ao modo de vida aquático. **A.** Golfinho da espécie *Stenella frontalis*, que chega a medir 2,2 m de comprimento. **B.** Pirarucu, peixe ósseo da espécie *Arapaima gigas*, que pode alcançar 3 m de comprimento. **C.** Representação artística de ictiossauro do gênero *Shonisaurus*, um réptil extinto que podia passar de 15 m de comprimento. **D.** Pinguim da espécie *Spheniscus humboldti*, que atinge 70 cm de comprimento.

Em certos organismos estão presentes estruturas atrofiadas ou sem função evidente – **estruturas vestigiais** –, interpretadas pela teoria evolucionista como evidência do parentesco entre os seres vivos. Um exemplo de estrutura vestigial humana é o apêndice vermiforme ou cecal, uma projeção intestinal em forma de dedo localizada na junção entre o intestino delgado e o intestino grosso. A presença do apêndice vermiforme na espécie humana é considerada uma evidência da evolução, pois esse órgão teria sido importante em nossos ancestrais remotos, que tinham dieta predominantemente herbívora; neles, o ceco (porção inicial do intestino grosso, na qual se abre o intestino delgado) e o apêndice abrigavam microrganismos auxiliares da digestão de celulose. Com o desenvolvimento de outros tipos de dieta, na linhagem que originou nossa espécie, as pressões seletivas que atuavam na manutenção do ceco e do apêndice com tamanhos avantajados deixaram de agir e esses órgãos regrediram a tamanhos compatíveis com suas funções atuais.

Outra estrutura considerada vestigial é a pequena "cauda" das aves, popularmente chamada coranchim, composta de diversos ossos. Por que tantos ossos numa cauda tão pequena? A explicação evolutiva é que as pressões seletivas que atuam na manutenção da longa cauda de certos répteis deixaram gradativamente de agir nos ancestrais das aves. Assim, o número e o tamanho dos ossos da cauda das aves sofreram redução compatível com a função que a cauda desempenha atualmente na ancoragem de certos músculos nesses organismos. (Fig. 5.20)



PHIL DEGGINGER/SCIENCE SOURCE/FOTOARENA

ARIE VAN'T RIET/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 5.20 **A.** Esqueleto de pombo, no qual é possível observar os ossos que compõem o coranchim, considerado uma estrutura vestigial. **B.** Esqueleto de lagarto evidenciando a cauda comprida, homóloga ao coranchim das aves.

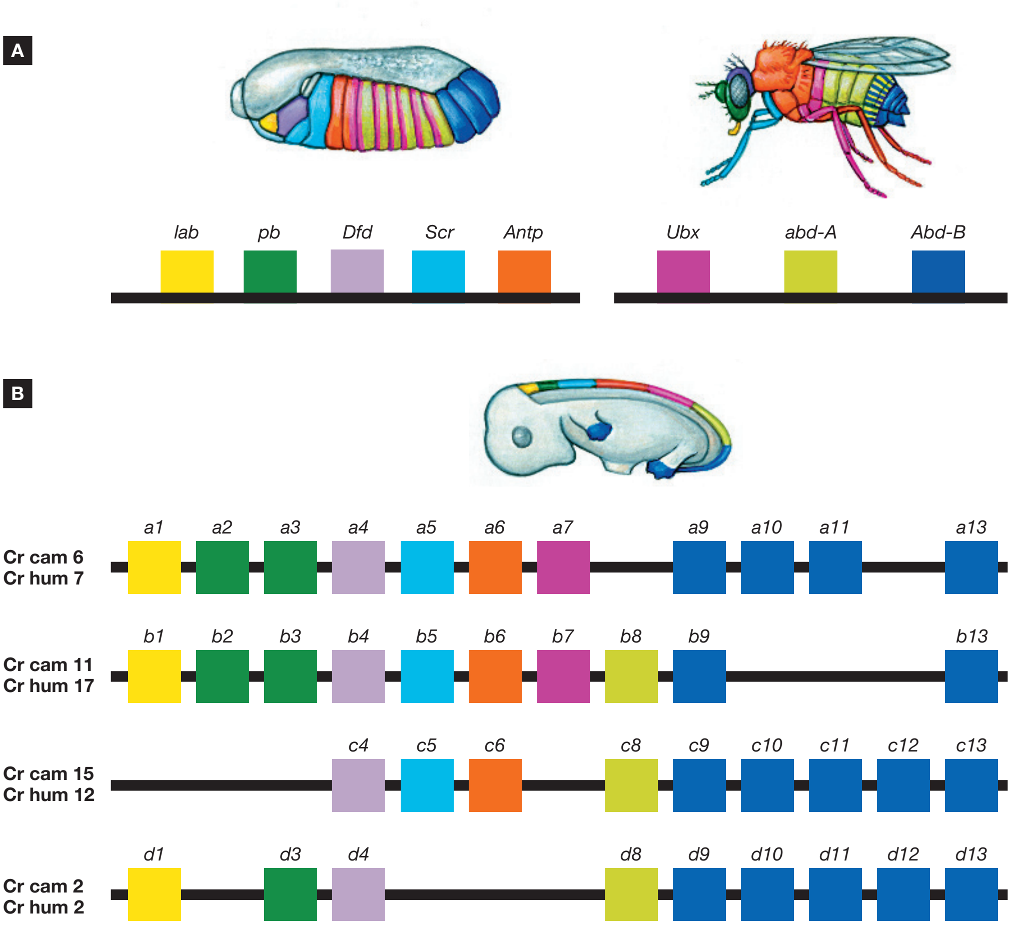
Semelhanças genéticas como evidências da evolução biológica

As características típicas de cada espécie de ser vivo são hereditárias. É a atividade de genes específicos, herdados dos pais, que determina o destino das células embrionárias e dirige a formação das diversas estruturas corporais próprias da espécie. Os cientistas estão apenas começando a identificar o modo como os genes atuam na construção do corpo dos animais, mas os resultados já são surpreendentes e constituem, possivelmente, a mais importante evidência do parentesco evolutivo entre as espécies.

Um conjunto de genes descobertos originalmente na mosca drosófila, denominados **genes homeóticos**, determina o padrão e a sequência em que o desenvolvimento embrionário ocorre. Alguns desses genes, conhecidos pela sigla *Hox*, são ativados bem no início do desenvolvimento embrionário. Quando o embrião começa a exibir a segmentação corporal, apesar de todos os segmentos parecerem iguais, cada um deles tem um conjunto particular de genes *Hox* em atividade e já está destinado a se tornar determinada parte do corpo da mosca. São esses genes que "dizem" às células de cada segmento o que elas devem originar: se vão ser asa, perna, antena ou parte do abdome. Os genes *Hox* desencadeiam reações de outros genes, que juntos determinam a formação de uma parte específica do corpo do animal. Eles atuam como "mestres" no processo embrionário, comandando a ação de outros genes.

A grande surpresa dos cientistas foi descobrir que há genes *Hox* quase idênticos aos das moscas nos outros animais, como camundongos, estrelas-do-mar, crustáceos, seres humanos etc. E o mais surpreendente é que esses genes exercem a mesma função em todos os animais, determinando as diferentes estruturas corporais ao longo do eixo cabeça-cauda.

Assim, tanto no embrião de uma mosca como em um embrião humano, a cabeça forma-se na região anterior do corpo porque ali atuam genes *Hox* muito parecidos em ambos os animais. (Fig. 5.21)


A
lab
pb
Dfd
Scr
Antp
Ubx
abd-A
Abd-B
B
a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a9 a10 a11 a13
Cr cam 6
Cr hum 7
b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 b13
Cr cam 11
Cr hum 17
c4 c5 c6 c8 c9 c10 c11 c12 c13
Cr cam 15
Cr hum 12
d1 d3 d4 d8 d9 d10 d11 d12 d13
Cr cam 2
Cr hum 2

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Figura 5.21 Representação esquemática dos genes *Hox*, que determinam a anatomia corporal no eixo cabeça-cauda, em drosófila (**A**) e em camundongo (**B**). Os genes estão representados por quadrados coloridos; as partes dos embriões da mosca e do camundongo, assim como da mosca adulta, cujo desenvolvimento é controlado por cada gene, estão representadas pela mesma cor. Os invertebrados têm um único conjunto desses genes, enquanto os vertebrados têm quatro conjuntos. Em (**B**) estão indicadas as localizações dos genes *Hox* nos cromossomos humanos (Cr hum) e nos cromossomos do camundongo (Cr cam). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Outros genes homeóticos responsáveis pelo desenvolvimento de diversos órgãos têm sido descobertos: o gene *Pax*-6, por exemplo, está associado à formação de olhos em todos os grupos animais, desde os ocelos das planárias até os complexos olhos de insetos e vertebrados.

Em um experimento instigante, os geneticistas substituíram um gene *Pax*-6 defeituoso de um ovo de mosca, que normalmente originaria uma mosca sem olhos, pelo gene correspondente não defeituoso de um camundongo: a mosca nasceu com olhos de mosca perfeitos. Assim, o gene do camundongo foi capaz de exercer sua função nas células da mosca, desencadeando a ação "em cascata" de genes responsáveis pela formação do órgão visual. Isso tudo apesar de esses animais terem divergido, no curso da evolução, há centenas de milhões de anos! A similaridade entre os genes homeóticos das moscas e os nossos é tal que podemos substituir um gene defeituoso de mosca pelo correspondente humano, e a mosca nascerá normal.

As grandes semelhanças entre genes homeóticos de diferentes espécies, não apenas no que se refere à sequência de bases nitrogenadas, mas principalmente em seu intrincado modo de funcionamento, devem-se, segundo a teoria evolucionista, ao fato de esses genes terem sido herdados de um ancestral comum a todos os animais. Mais tarde, quando surgiram as linhagens que originaram os diversos filos animais, esses genes adaptaram-se e passaram a determinar tipos diferentes de partes corporais.

Ressalte que a moderna teoria evolucionista surgiu da contribuição de diversos cientistas, que incorporaram novos conhecimentos da Genética à ideia de seleção natural de Darwin. Esse tipo de discussão é importante para mostrar aos estudantes que o empreendimento científico resulta das contribuições integradas de vários cientistas ao longo desses séculos de cultura.

5.3 A teoria sintética da evolução

Durante as décadas de 1930 e 1940, os conhecimentos genéticos foram incorporados ao conceito de seleção natural, ponto central do darwinismo, e ajudaram a compor a chamada **teoria sintética da evolução** ou teoria moderna da evolução, que explica a origem da diversidade biológica. Alguns autores costumam dar a essa teoria o nome de **neodarwinismo**.

A teoria sintética da evolução considera três fatores evolutivos principais: a) mutação gênica; b) recombinação gênica; c) seleção natural. As diferenças genéticas entre os indivíduos de uma população, que constituem sua **variabilidade genética** ou **diversidade genética**, são geradas e mantidas por dois fatores: as mutações que acontecem ao acaso ao longo da história evolutiva da espécie e a recombinação gênica que ocorre em cada geração. A variabilidade genética não se refere apenas à diversidade em determinado momento, mas à própria capacidade de variar. A seleção natural atua sobre essa variabilidade, "selecionando" os indivíduos mais aptos a sobreviver e se reproduzir em cada contexto evolutivo.

Principais fatores evolutivos

Mutação gênica

Mutações gênicas são alterações na sequência de bases nitrogenadas do DNA que originam novas versões – alelos – de um gene. Se a característica produzida por um alelo mutante confere alguma vantagem ao seu portador, o novo alelo tende a ser preservado pela seleção natural e ter sua frequência aumentada na população.

O conjunto de genes típico de cada espécie é o resultado do acúmulo de mutações vantajosas, que vêm ocorrendo e se mantendo por ação da seleção natural durante os bilhões de anos de evolução biológica. Muitas das mutações vantajosas possíveis já foram selecionadas, o que explica por que a maioria das mutações atuais tem efeitos deletérios, isto é, é prejudicial a seus portadores.

As mutações gênicas podem ocorrer espontaneamente pela própria dinâmica das moléculas de DNA, sendo chamadas, nesse caso, **mutações espontâneas**. Uma das causas da mutação espontânea dos genes é a transformação temporária de uma base nitrogenada em outra, fenômeno que os químicos denominam tautomeria, e que pode provocar erros na duplicação dos genes. Por exemplo, a citosina (C) de uma cadeia de DNA pode eventualmente perder seu grupo amina, transformando-se em uracila (U). Se isso ocorrer no momento da duplicação do DNA, a uracila orienta o emparelhamento de um nucleotídio com adenina (A) na posição complementar, e não com guanina (G), como deveria ser. Consequentemente, uma das moléculas de DNA proveniente dessa duplicação ficará com sua sequência de bases alterada, isto é, sofrerá uma mutação. Ao se reproduzir, a molécula mutante origina cópias idênticas a si e a mutação se perpetua. (Fig. 5.22)

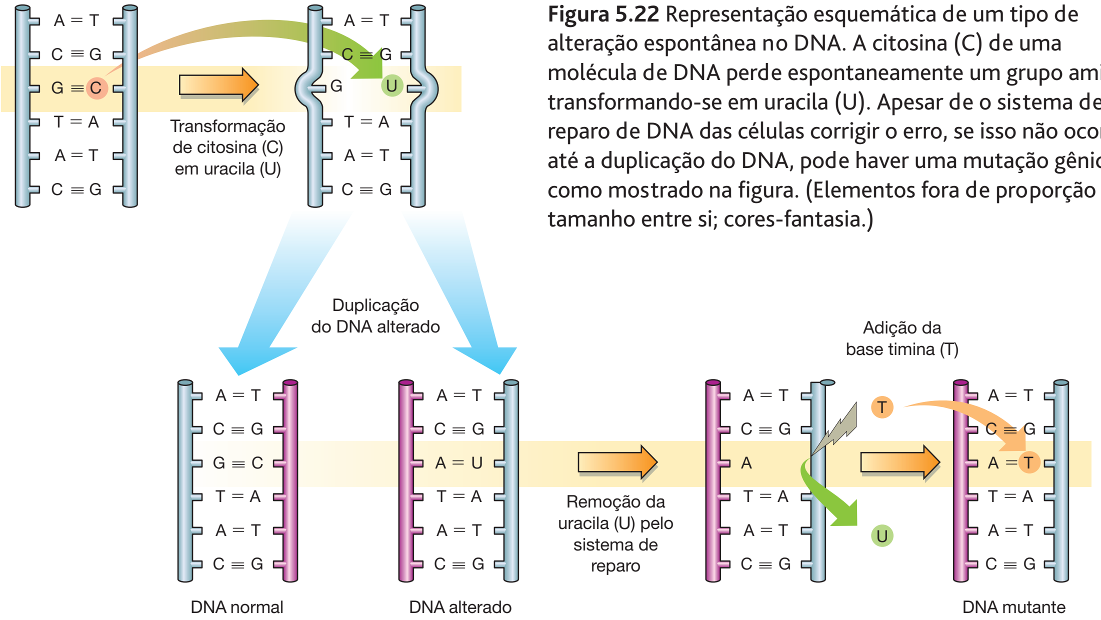

A = T
C ≡ G
G ≡ C
T = A
A = T
C ≡ G
Transformação de citosina (C) em uracila (U)
G
U
Duplicação do DNA alterado
A = U
Remoção da uracila (U) pelo sistema de reparo
A
T
U
Adição da base timina (T)
A = T
DNA normal
DNA alterado
DNA mutante

Figura 5.22 Representação esquemática de um tipo de alteração espontânea no DNA. A citosina (C) de uma molécula de DNA perde espontaneamente um grupo amina, transformando-se em uracila (U). Apesar de o sistema de reparo de DNA das células corrigir o erro, se isso não ocorrer até a duplicação do DNA, pode haver uma mutação gênica, como mostrado na figura. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

As mutações também podem ser induzidas por agentes físicos e químicos, genericamente chamados **agentes mutagênicos**. Por exemplo, radiações ionizantes como os raios X, os raios gama e a radiação ultravioleta causam a formação de íons nas células e aumentam as taxas de mutação dos genes de vírus e bactérias e até de animais e plantas. Além das radiações ionizantes, há outros fatores físicos e diversas substâncias capazes de aumentar a taxa de mutação dos genes.

Recombinação gênica

Recombinação gênica é a mistura de genes que ocorre na reprodução sexuada, em que os genes provenientes dos pais se rearranjam. Embora a mutação seja responsável pelo surgimento de novos alelos na população, é pela recombinação gênica que os genes do conjunto gênico se organizam em novos arranjos em cada indivíduo, sobre o qual a seleção natural atua.

Nos organismos eucarióticos, a recombinação gênica ocorre por dois processos meióticos: a) **segregação independente dos cromossomos**; b) **permutação** ou *crossing-over*. No primeiro, cromossomos homólogos originalmente provenientes dos pais combinam-se livremente, de maneira que os gametas formados podem conter desde só cromossomos maternos até só cromossomos paternos, passando por todas as misturas entre esses cromossomos. O número de combinações possíveis entre cromossomos maternos e paternos pode ser calculado pela expressão 2^n, em que n é o número de pares de cromossomos da espécie considerada. (Fig. 5.23)

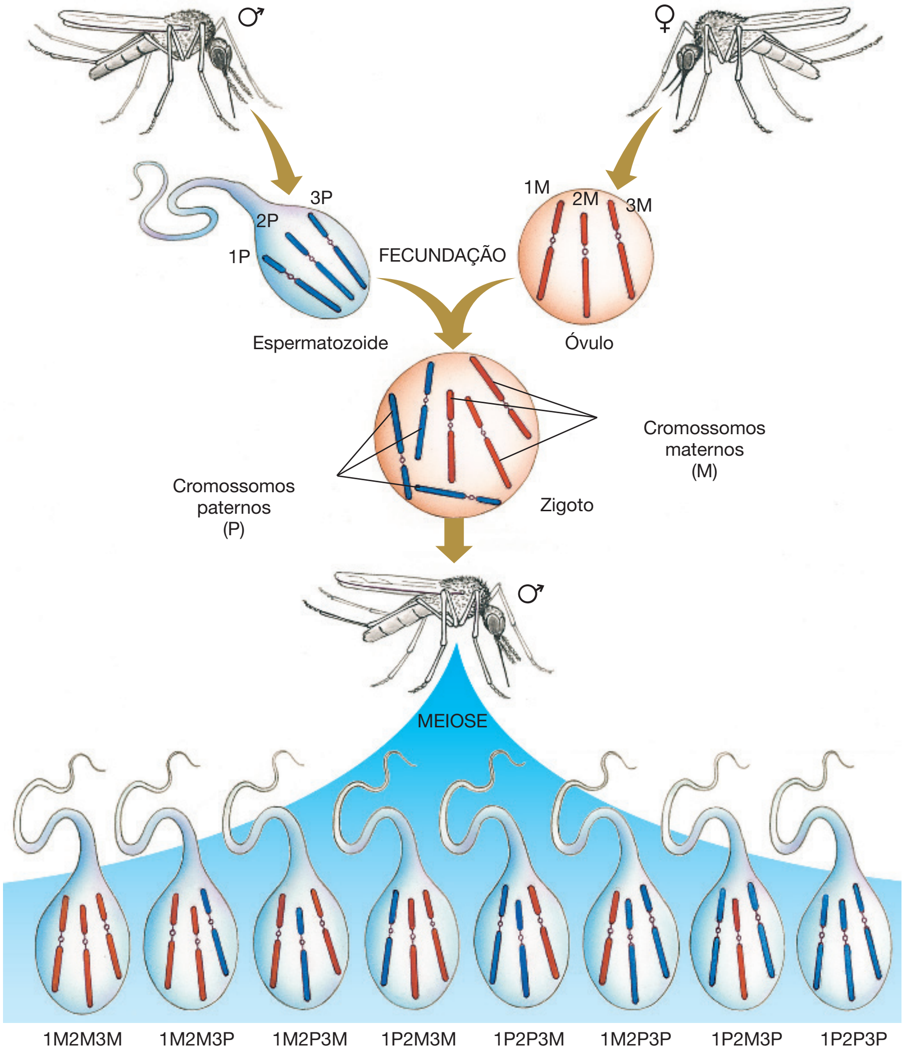


Figura 5.23 Representação esquemática da segregação independente dos cromossomos homólogos de origem materna (em vermelho) e paterna (em azul). Uma espécie como o pernilongo, que possui apenas três pares de cromossomos, produz oito combinações cromossômicas diferentes nos gametas (2^3). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Na espécie humana, em que $n = 23$, uma pessoa pode produzir 2^{23} (8.388.608) tipos de gametas, levando em conta as diferentes combinações entre os cromossomos herdados da mãe e do pai. A probabilidade de um gameta humano conter apenas cromossomos de origem paterna seria igual a 1 em cada 8.388.608 gametas, a mesma que a de possuir apenas cromossomos de origem materna.

A diversidade de gametas produzidos por uma pessoa é, no entanto, muito maior, pois, além da segregação independente dos cromossomos, a variedade de tipos de gametas é aumentada pela permutação, fenômeno em que cromossomos homólogos maternos e paternos trocam pedaços entre si durante a meiose.

Seleção natural

Todos os organismos, sejam plantas, fungos, protoctistas, animais, arqueas ou bactérias, “lutam” para sobreviver em cada instante de sua vida. Os mais aptos a enfrentar os desafios de seu contexto particular têm maior chance de sobreviver.

A “luta pela sobrevivência”, metáfora utilizada por Darwin para a seleção natural, inspira-se no fato de que, entre os animais, alguns são presas e têm de evitar ser devorados; outros são predadores e têm de capturar animais que lhes sirvam de alimento, ou morrerão de fome.

Entretanto, Darwin ressaltou que há formas menos evidentes de lutar pela vida: por exemplo, em diversas espécies animais, os machos disputam entre si a atenção das fêmeas e o direito de acasalar com elas, o que lhes permite perpetuar suas características. Plantas competem umas com as outras pela umidade do solo, por nutrientes e até mesmo pela luz solar. De uma forma ou de outra, em última análise, a seleção natural implica a reprodução diferencial dos indivíduos de uma população, em que os mais bem adaptados têm maior chance de deixar descendentes.

A seleção decorre das restrições que o meio impõe à sobrevivência dos organismos, como disponibilidade de alimento, disputa por recursos com outros seres vivos, ação de predadores e parasitas, doenças etc. Nessas condições, os mais aptos a sobreviver são aqueles que herdaram combinações gênicas mais favoráveis à vida e à reprodução em um ambiente particular. (Fig. 5.24)

Figura 5.24 Um guepardo (*Acinononyx jubartus*), ao atacar um bando de gazelas-de-thomson (*Eudorcas thomsonii*), está desempenhando seu papel no processo de evolução das espécies por seleção natural. O guepardo e a gazela-de-thomson medem, respectivamente, cerca de 130 cm e 90 cm de comprimento. (Parque Nacional Serengeti, Tanzânia.)

ADAM JONES/THE IMAGE BANK/GETTY IMAGES

Um exemplo bem estudado de seleção natural na espécie humana refere-se ao alelo da siclemia ou anemia falciforme, uma forma hereditária de anemia. Pessoas homozigóticas para o alelo condicionante da siclemia (*ss*) têm anemia severa e, se não receberem tratamento, morrerão antes de atingir a idade reprodutiva. Pessoas heterozigóticas têm anemia leve. A tendência da seleção natural, atuando sobre esse alelo, seria levar à sua eliminação da população humana. E é isso o que realmente acontece na maior parte do mundo. Entretanto, em locais onde a malária é endêmica, a frequência do alelo mutante *s* é surpreendentemente elevada. Por que isso ocorre?

Descobriu-se que as pessoas heterozigóticas (*Ss*) são mais resistentes à malária que as pessoas homozigóticas normais (*SS*). Como estas últimas tendem a morrer de malária em maior frequência, e as homozigóticas siclêmicas (*ss*) tendem a morrer de anemia, quem tem maior chance de sobreviver e se reproduzir são as pessoas heterozigóticas (*Ss*), que podem transmitir o alelo *s* à geração seguinte. Isso explica por que o alelo para a siclemia se mantém em frequências relativamente altas nessas populações. (Fig. 5.25)

Frequência do alelo da anemia falciforme

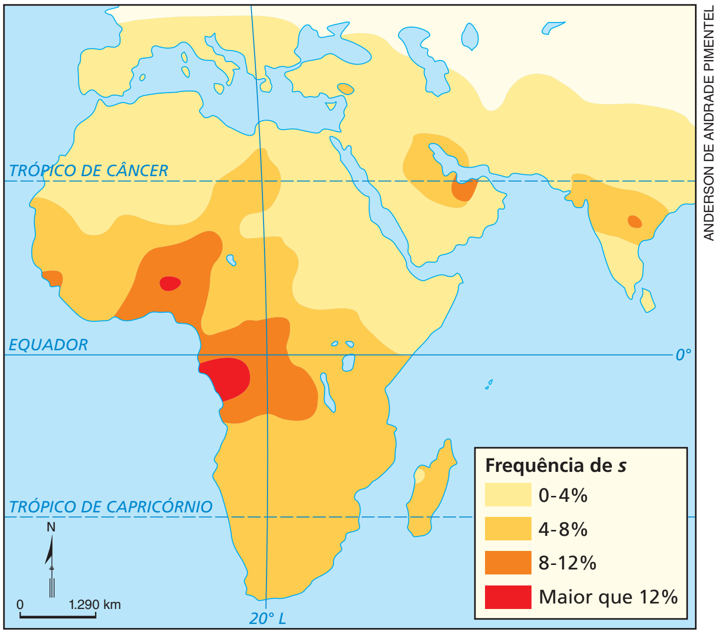


Figura 5.25 Frequência do alelo que condiciona a anemia falciforme (*s*) na África, no Oriente Médio, no sul da Europa e na Índia. As populações em que o alelo causador da doença estava presente em frequência alta viviam em regiões em que havia grande incidência de malária. (Elaborado com base em Allison, A. C., 1960.)

Ciência e cidadania

Resistência a drogas e seleção natural

1 Você já ouviu dizer que antigamente determinado antibiótico era eficaz no combate às infecções bacterianas, mas hoje parece não funcionar tão bem? Afirma-se o mesmo dos inseticidas, que já não parecem exterminar os insetos como antes. Será que se trata apenas de saudosismo ou há base científica nessas observações?

2 Os cientistas constataram que nas populações bacterianas sempre estão surgindo, por mutação gênica ou por trocas gênicas, bactérias resistentes a diversas substâncias tóxicas, entre elas certos antibióticos. Se esses antibióticos não estão presentes no meio, as bactérias mutantes não levam nenhuma vantagem sobre as bactérias selvagens (não mutantes), sendo eliminadas na competição com estas últimas. Entretanto, se um daqueles antibióticos estiver presente no meio, as bactérias mutantes resistentes levarão uma grande vantagem em relação às bactérias sensíveis.

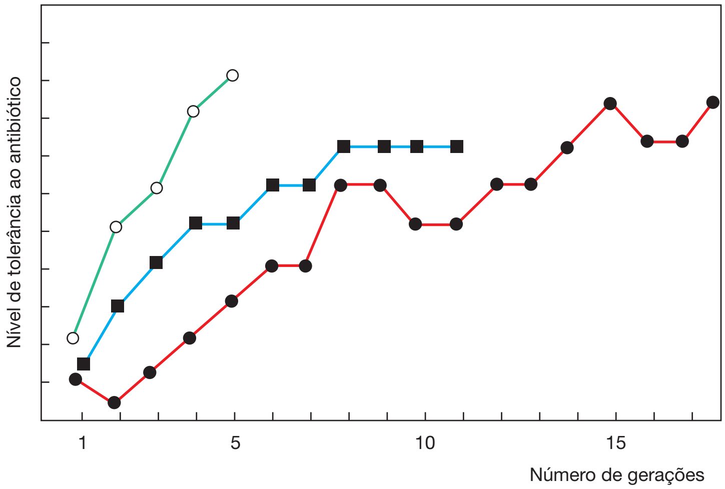
3 Do ponto de vista evolutivo, o antibiótico atua como um agente seletivo, que mata as bactérias selvagens e deixa os recursos à disposição das bactérias resistentes. Estas se reproduzem e dão origem a populações inteiras de bactérias resistentes, contra as quais aquele antibiótico exerce pouco efeito.

▶ **4** Desde que os antibióticos começaram a ser empregados em larga escala, logo após a Segunda Guerra Mundial, já foram selecionadas inúmeras linhagens bacterianas altamente resistentes aos mais diversos tipos de antibiótico. O uso indiscriminado de antibióticos deve ser evitado justamente para minimizar o desenvolvimento de linhagens bacterianas resistentes.

5 Os inseticidas também atuam como agentes seletivos de linhagens de insetos resistentes a essas drogas. Nas populações de insetos estão sempre surgindo, por mutação gênica, indivíduos capazes de resistir a diversas substâncias, entre elas os inseticidas. Caso estes sejam aplicados sobre uma população de insetos em que haja mutantes resistentes à droga, os indivíduos selvagens serão eliminados, ao passo que os resistentes se multiplicarão, passando a constituir a quase totalidade da população.

6 Conclui-se que, tanto no caso da resistência a antibióticos quanto no da resistência a inseticidas, as próprias drogas funcionam como agentes seletivos, eliminando os portadores de genótipos sensíveis e favorecendo a proliferação dos portadores de genótipos resistentes.

Seleção de mutantes resistentes a antibióticos



FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Gráfico que mostra os resultados de três experimentos (curvas coloridas) em que linhagens da bactéria *Escherichia coli* desenvolveram resistência ao antibiótico cloranfenicol. Gerações sucessivas de bactérias foram cultivadas em meios com concentrações crescentes desse antibiótico. Os resultados evidenciam a seleção de diversas mutações para resistência. (Elaborado com base em Stebbins, G. L., 1974.)

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

Além de apresentar exemplos recentes de seleção natural, o quadro alerta para o uso indiscriminado de antibióticos e inseticidas. Acompanhe nossas sugestões para a leitura.

1 Leia os parágrafos 1 e 2. O primeiro traz observações baseadas no senso comum e o segundo se fundamenta em dados científicos. A ideia de seleção natural, embora não mencionada, aparece no segundo parágrafo. Com base nessas informações, elabore um texto conciso que relacione, nesse caso, mutação e seleção natural.

2 Leia o terceiro parágrafo e confirme a ideia da seleção natural beneficiando os mutantes, nesse caso.

3 Leia o quarto parágrafo, acompanhando-o com a análise do gráfico. Em função desses dados, como você interpreta a determinação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) que proíbe a venda de antibióticos sem receita médica? Informe-se mais sobre o assunto, se possível conversando com algum profissional de saúde (médico, farmacêutico etc.).

4 O parágrafo de número 5 trata da resistência a inseticidas que populações de insetos podem adquirir por seleção natural. O uso indevido dessas substâncias na agricultura pode levar ao surgimento de populações resistentes. Pesquise a respeito. Há algum tipo de legislação ou fiscalização referente a esses produtos?

5 Leia o último parágrafo do quadro. Ele resume e confirma o que foi discutido? Justifique.

Ciência e cidadania

Médicos identificam superbactéria inédita em paciente brasileiro

1 "Uma superbactéria inédita no mundo foi identificada no sangue de um paciente que ficou internado no Hospital das Clínicas de São Paulo [...] e colocou a comunidade científica internacional em alerta.

2 O microrganismo estava alojado em um homem de 35 anos que tinha micose fungoide (um tipo de câncer de pele). Ele também era diabético e dependente químico.

3 Segundo a médica Flávia Rossi, diretora do laboratório de Microbiologia do HC [...], o homem começou a apresentar muitas infecções na pele e depois no sangue. Apesar do tratamento com diversos antibióticos, a febre persistia.

4 A superbactéria é de uma classe já conhecida, mas tem características que a tornam única: a capacidade de infectar pessoas saudáveis, fora do hospital, e um alto nível de resistência aos antibióticos mais usados para tratar infecções severas.

5 O artigo com a descrição do caso foi publicado [...] na revista *The New England Journal of Medicine*. O trabalho reuniu pesquisadores brasileiros, americanos e europeus.

6 'É diferente de tudo o que já vimos. Essa mutação pode causar infecções na comunidade e não mais só nos hospitais', alerta o médico Cesar Arias, líder da equipe de pesquisa do Centro de Ciências da Saúde da Universidade do Texas, em Houston (EUA).

7 A cepa original da superbactéria pertence a uma classe conhecida como Sarm (*Staphylococcus aureus* resistente à meticilina) e é uma das causas mais comuns de infecções de pele e mucosas em pessoas de todas as idades, inclusive as saudáveis.

8 Mais virulento e resistente, o novo microrganismo representa um problema de saúde pública, na avaliação de Cesar Arias. [...]

9 A superbactéria foi isolada em uma das análises de rotina do laboratório. Além da resistência incomum, a equipe do HC percebeu que ela tinha um padrão diferente das que já haviam sido descritas. O material foi enviado, então, ao grupo de Arias, no Texas, onde foi feita uma investigação molecular detalhada.

10 'A 'alma' dela, que é a parte genética, está ligada a bactérias de linhagem comunitária. Todas as descritas anteriormente, que já eram poucas [13 no mundo], eram de linhagem hospitalar, tinham um DNA maior. Essa nova tem um DNA menor, o que facilita a transmissão mais rápida e também entre pessoas saudáveis da comunidade.'

11 No caso do paciente do HC, a infecção causada pela superbactéria foi debelada com um antibiótico mais potente (bactemicina), mas, debilitado, o homem morreu três meses depois de pneumonia [...].

12 Segundo Flávia, como o microrganismo não infectou outros pacientes, não há risco imediato nem motivo para alarme. No entanto, reforça a médica, é preciso intensificar a vigilância, especialmente dentro dos hospitais.

13 Ela diz que ainda há no país muitas instituições sem laboratórios de Microbiologia para a detecção rápida e tratamento correto da infecção. 'Se eu não tenho um laboratório bem estruturado e bem equipado, não tenho como reconhecer a bactéria.'

14 Flávia explica que hoje há uma deficiência de suporte diagnóstico. 'Às vezes, a devolução do resultado de um exame demora cinco dias. Se for mais rápido, consigo intervir mais precocemente.'

15 Para ela, com o alerta mundial, novos estudos de vigilância microbiológica serão feitos. 'Precisamos entender melhor a genética dessa bactéria e monitorá-la de perto.'"

Fonte: COLLUCCI, C. Médicos identificam superbactéria inédita em paciente brasileiro. *Folha de S.Paulo*. Disponível em: <www1.folha.uol.com.br/equilibrioesaude/2014/04/1443956-medicosidentificam-superbacteria-inedita-em-paciente-brasileiro.shtml>. Acesso em: mar. 2016.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

1. Leia os parágrafos de 1 a 4 e responda: quais são as principais dificuldades de combater uma epidemia causada por uma superbactéria?
2. Um dado não mencionado no texto é o índice de automedicação no Brasil, que varia muito conforme as regiões estudadas, mas pode chegar a cerca de 90%. Como esse hábito pode estar relacionado com o surgimento de superbactérias?
3. Leia os parágrafos 12, 13 e 14, sobre o alerta que a reportagem traz sobre a infraestrutura nos hospitais para o combate de infecção hospitalar. Discuta com seus colegas a situação dos hospitais públicos da sua cidade ou região. O que vocês conhecem sobre o assunto? Vocês consideram a situação ideal? Se não consideram, o que vocês proporiam para melhorá-la?

5.4 Adaptação e evolução

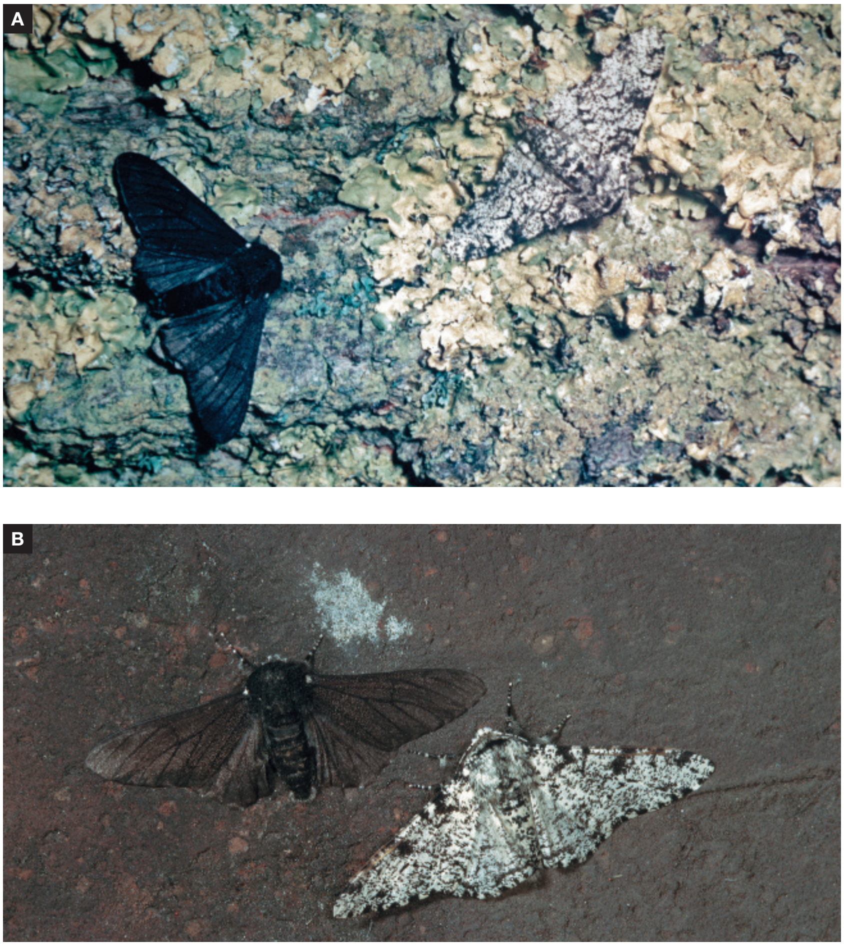
O termo **adaptação** (do latim *adaptare*, tornar apto) significa, para os biólogos, a capacidade que todo ser vivo tem de se ajustar ao ambiente, isto é, de se adequar em resposta a uma alteração ambiental. A capacidade de adaptação está indissoluvelmente ligada à manutenção da vida.

Podemos focalizar a adaptação em dois níveis: no indivíduo e na população. No primeiro caso, a adaptação consiste no ajustamento individual a determinada mudança ambiental e é denominada **homeostase** (do grego *homoios*, da mesma natureza, igual, e *stasis*, estabilidade). Por exemplo, quando a temperatura ambiental sobe, ficamos vermelhos e começamos a suar. A vermelhidão da pele deve-se à dilatação dos vasos sanguíneos periféricos, que passam a irradiar mais calor, resfriando o corpo, processo auxiliado pela sudorese.

Do ponto de vista populacional, **adaptação evolutiva** é o processo em que uma população se ajusta ao ambiente ao longo de sucessivas gerações como resultado da seleção natural.

Melanismo industrial como exemplo de adaptação evolutiva

Um dos estudos que mostram a ação da seleção natural é o da dinâmica de populações da mariposa *Biston betularia*, em áreas industriais da Inglaterra e do norte dos Estados Unidos, ao longo dos últimos 160 anos. A partir de 1850, observou-se que a forma melânica (do grego *mélas*, escuro, negro) dessa mariposa, na época extremamente rara, foi se tornando gradativamente comum nas áreas industrializadas, até suplantar as mariposas claras e passar a ser predominante. O fenômeno foi denominado **melanismo industrial** porque a predominância das mariposas melânicas estava nitidamente associada ao aumento da industrialização, responsável pela liberação de poluentes atmosféricos que matam os liquens dos troncos das árvores e os tornam enegrecidos pela fuligem. (Fig. 5.26)



BRUCE COLEMAN INTERNATIONAL/DIOMEDIA
STEPHEN DALTON/NATURE PL/DIOMEDIA

Figura 5.26 Variedades clara e melânica da mariposa *Biston betularia*, cujos indivíduos adultos têm aproximadamente 6 cm de envergadura. **A.** Em troncos de árvores cobertos por liquens, a forma melânica torna-se bem visível, enquanto a forma clara é quase imperceptível. **B.** Em troncos cobertos por fuligem, a situação é inversa: as mariposas melânicas são menos visíveis que as claras.

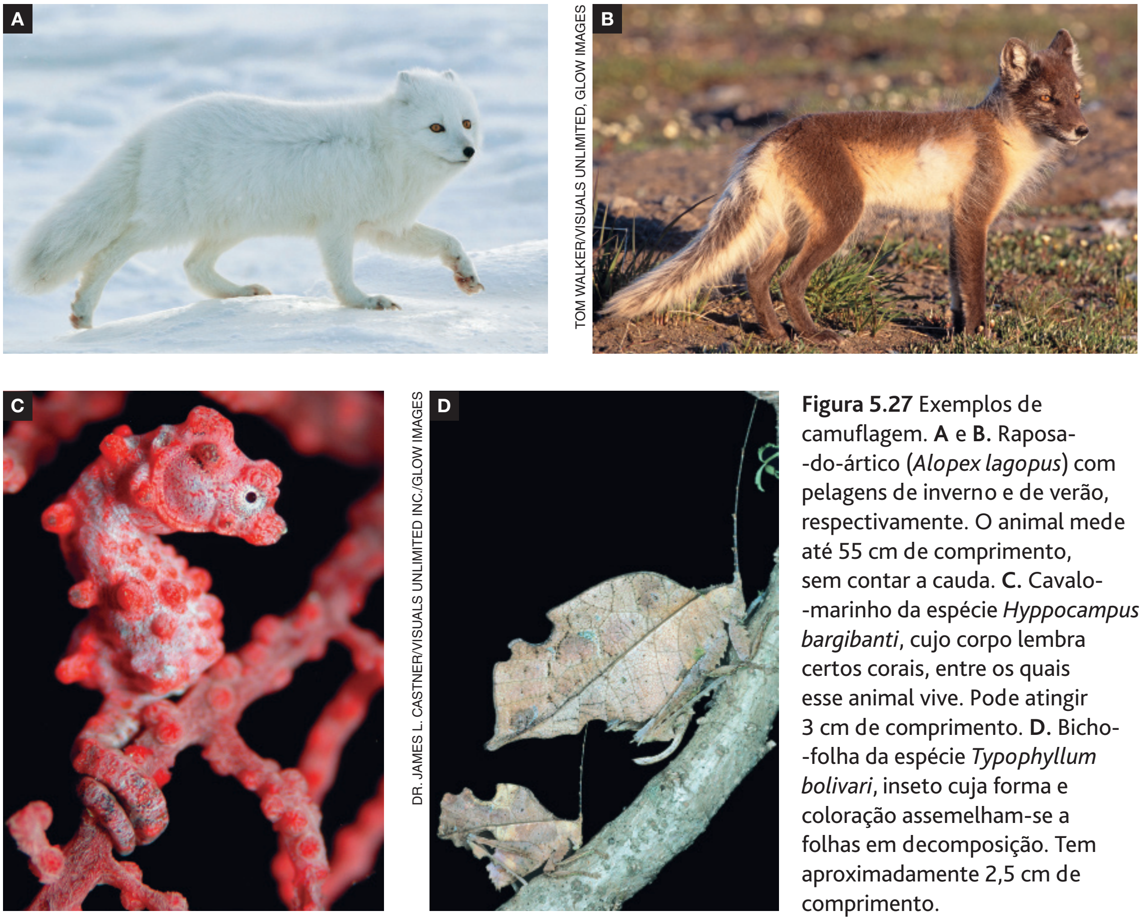
Estudos realizados em bosques poluídos e não poluídos mostraram que as mudanças nas frequências de mariposas claras e escuras resultam da predação seletiva por pássaros. Nos bosques não poluídos, as mariposas melânicas, ao pousar nos troncos cobertos de liquens, ficam bem visíveis e são facilmente percebidas e comidas por pássaros, o que explica o fato de serem raras nesses locais. Ao contrário, nos bosques poluídos, são as mariposas claras que se tornam visíveis ao pousar nos troncos escuros cobertos de fuligem. Nessa condição pós-industrialização, as formas melânicas de mariposas passaram a ter maior chance de sobrevivência, por sofrerem menor predação dos pássaros. Assim, a seleção natural realizada pelos pássaros predadores levou à predominância da variedade melânica sobre a variedade clara nas áreas poluídas.

Há alguns anos a metodologia empregada nos trabalhos pioneiros sobre melanismo industrial foi objeto de críticas, mas experimentos recentes, com métodos mais acurados, confirmaram aquelas conclusões e o melanismo industrial das mariposas continua a ser um exemplo clássico de evolução, observado em tempo real.

Camuflagem, coloração de aviso e mimetismo

Camuflagem é o tipo de adaptação em que uma espécie desenvolveu características que a confundem com o ambiente e dificultam sua localização. Mariposas *B. betularia* claras, por exemplo, apresentam camuflagem em relação aos troncos cobertos por liquens; as melânicas ficam camufladas ao pousar sobre troncos enegrecidos pela fuligem.

Outro exemplo interessante de camuflagem é o das raposas-do-ártico, que apresentam pelagem branca no inverno, quando o ambiente está coberto pela neve, e pelagem colorida nas outras épocas do ano, quando não há neve. No inverno, a pelagem branca permite que as raposas se confundam com o ambiente, tornando-se menos visíveis, o que facilita a aproximação das presas e a ocultação dos predadores. Quando não há neve, é a pelagem colorida que confere maior camuflagem. É importante ressaltar que a troca de pelagem não ocorre por uma decisão do animal, mas é uma característica adaptativa incorporada à espécie ao longo de sua evolução. (Fig. 5.27)



ROBERTA OLENICK/ALL CANADA PHOTOS/DIOMEDIA

TOM WALKER/VISUALS UNLIMITED, GLOW IMAGES

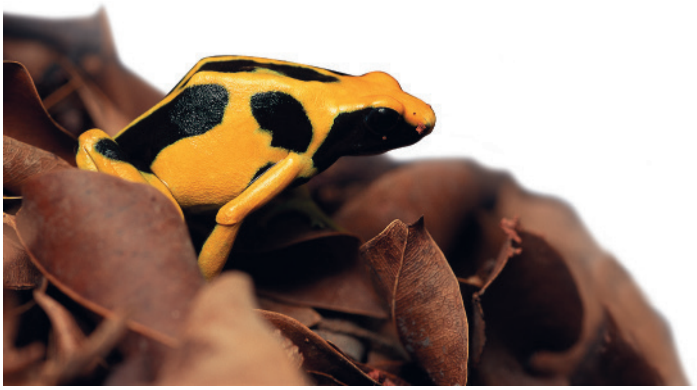
REINHARD DIRSCHERL/VISUALS UNLIMITED/GLOW IMAGES

DR. JAMES L. CASTNER/VISUALS UNLIMITED INC./GLOW IMAGES

Figura 5.27 Exemplos de camuflagem. **A** e **B.** Raposa-do-ártico (*Alopex lagopus*) com pelagens de inverno e de verão, respectivamente. O animal mede até 55 cm de comprimento, sem contar a cauda. **C.** Cavalo-marinho da espécie *Hyppocampus bargibanti*, cujo corpo lembra certos corais, entre os quais esse animal vive. Pode atingir 3 cm de comprimento. **D.** Bicho-folha da espécie *Typophyllum bolivari*, inseto cuja forma e coloração assemelham-se a folhas em decomposição. Tem aproximadamente 2,5 cm de comprimento.

Algumas espécies têm cores e desenhos marcantes que, em vez de escondê-las, as destacam no ambiente. Essa coloração, denominada **coloração de aviso** ou **coloração de advertência**, funciona como proteção por mostrar aos predadores que o animal que a ostenta tem sabor desagradável, é tóxico ou perigoso e deve ser evitado.

Exemplos de organismos que exibem coloração de aviso são sapos e pererecas coloridos, em cuja pele há venenos poderosos, e répteis peçonhentos, como as cobras-coral, cujo padrão de cores vivas da pele alerta sobre o perigo que representam. Um predador inexperiente pode atacar presas dotadas de coloração de aviso, mas logo aprende a associar a sensação ruim à cor vistosa. Mesmo que ensinar a "lição" ao predador possa custar a vida de alguns indivíduos da população, esta é beneficiada em termos populacionais e evolutivos. (Fig. 5.28)

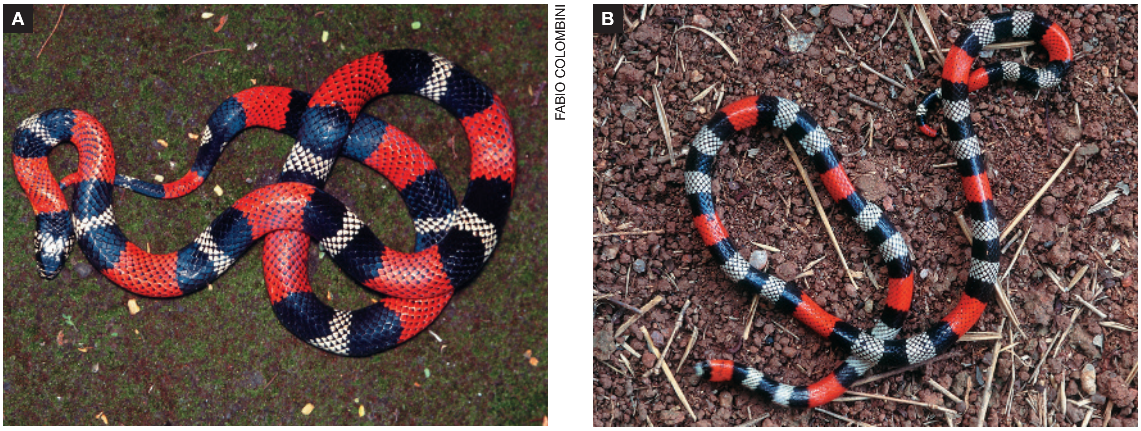


FABIO COLOMBINI

Figura 5.28 Anfíbio venenoso *Dendrobates* sp. com coloração de aviso, um alerta aos possíveis predadores sobre o perigo de tentar comê-lo. Mede aproximadamente 1,5 cm de comprimento.

Outro exemplo de adaptação é o **mimetismo**, em que duas espécies distintas compartilham alguma semelhança reconhecida por outras espécies. Essa adaptação confere vantagens para uma ou para ambas as espécies miméticas.

Um exemplo de mimetismo é encontrado nas serpentes popularmente conhecidas como cobras-coral. A espécie *Micrurus coralinnus*, uma coral-verdadeira, é altamente peçonhenta, enquanto a *Erythrolamprus aesculapii*, uma falsa-coral, não apresenta dentes injetores de peçonha e oferece pouco perigo a eventuais atacantes. O padrão de coloração dessas serpentes é bastante semelhante, apesar de elas pertencerem a famílias diferentes. De acordo com a teoria evolucionista, a semelhança de coloração é resultante de um processo de adaptação da falsa-coral, cujos ancestrais provavelmente se beneficiavam por serem parecidos com as corais-verdadeiras, com as quais conviviam. Em outras palavras, falsas-corais com padrão de coloração mais semelhante ao das corais-verdadeiras eram beneficiadas pela seleção natural e sua frequência na população tendia a aumentar geração após geração. (Fig. 5.29)



FABIO COLOMBINI

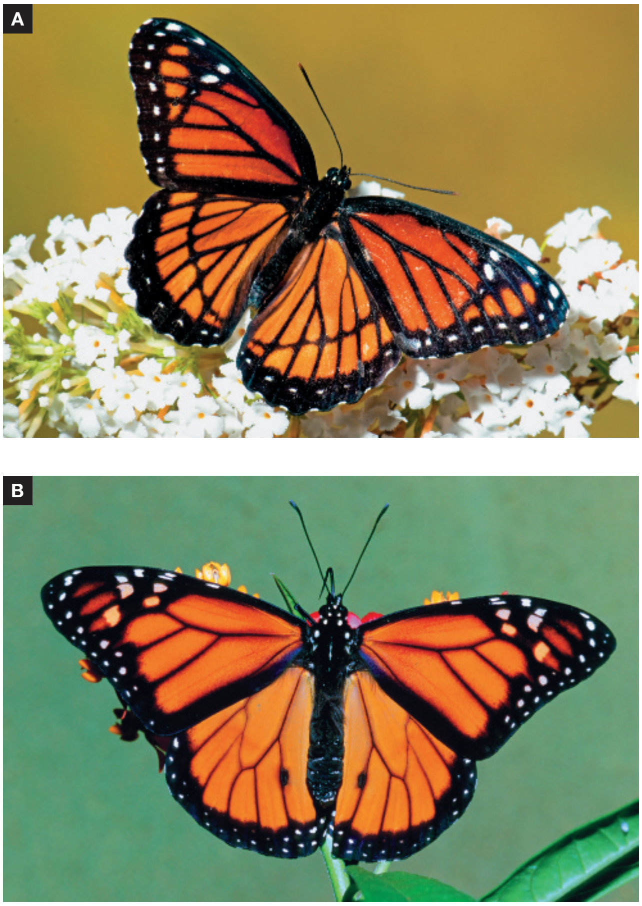
FABIO COLOMBINI

Figura 5.29 As imagens mostram um exemplo de mimetismo. **A.** Serpente falsa-coral *Erythrolamprus aesculapii*, animal que mede cerca de 80 cm de comprimento. **B.** Serpente coral-verdadeira *Micrurus coralinnus*, animal que mede aproximadamente 60 cm de comprimento. A falsa-coral é uma serpente pouco peçonhenta que mantém afastados possíveis predadores por se parecer com a coral-verdadeira.

Mimetismo batesiano e mimetismo mülleriano

No século XIX, o naturalista inglês Henry Walter Bates (1825-1892), ao estudar borboletas na Amazônia, teve sua atenção voltada para a grande semelhança de cor e desenhos das asas em duas famílias bem distintas de borboletas, Heliconiidae e Pieridae. As borboletas da família Heliconiidae são conhecidas por seu sabor extremamente desagradável aos pássaros, que aprendem a evitá-las. As borboletas da família Pieridae têm sabor agradável e são apreciadas por pássaros insetívoros.

A grande semelhança visual entre essas duas espécies tão distintas foi explicada por Bates como obra da seleção natural: borboletas de sabor agradável teriam vantagens seletivas por serem semelhantes a borboletas de gosto ruim. Pássaros que aprendem a evitar os espécimes dotados de coloração de aviso são iludidos pela coloração semelhante, exibida pelas borboletas de sabor agradável, passando a evitá-las. Ao longo do tempo, os indivíduos da espécie de sabor agradável que são mais parecidos com os modelos tóxicos tendem a ser selecionados positivamente. Desse modo, as semelhanças se acentuam. Essa adaptação, em que um modelo tóxico ou perigoso é "imitado" evolutivamente por espécies "saborosas" ou inofensivas, é o que se denominou **mimetismo batesiano**. (Fig. 5.30)



MILLARD H. SHARP/SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

MILLARD H. SHARP/SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

Figura 5.30 Exemplo de mimetismo batesiano. (**A**) A borboleta vice-rei (*Limentitis archippus*) não é tóxica e tem supostamente sabor agradável para seus predadores, mas desenvolveu grande semelhança com a borboleta-monarca (*Danaus plexippus*) (**B**), que é tóxica e tem sabor desagradável. A borboleta vice-rei tem aproximadamente 8 cm de envergadura e a monarca, cerca de 12 cm.

Em 1864, o alemão naturalizado brasileiro Fritz Müller (1822-1897) concluiu que a existência de várias espécies parecidas de borboletas tóxicas reforça a proteção de todas elas contra predadores. Isso ocorre porque os pássaros predadores "lembram-se" apenas de uma coloração de aviso a ser evitada. Se todas são parecidas, todas levam vantagem e são selecionadas positivamente. Esse tipo de "imitação evolutiva", em que um modelo tóxico ou perigoso é compartilhado evolutivamente por espécies também tóxicas ou perigosas, foi denominado **mimetismo mülleriano**.

Entre as serpentes corais-verdadeiras, todas elas peçonhentas, ocorre esse tipo de mimetismo. A semelhança entre várias espécies de corais-verdadeiras reforça o aviso de que é melhor evitá-las. Vale esclarecer que a explicação biológica para esse fato é que, entre todas as variações que naturalmente surgiram nas populações dessas espécies, foi selecionado o modelo que indica perigo, possivelmente por sua eficiência em afastar predadores.

Amplie seus conhecimentos

Em pequena escala, a evolução pode ser observada em ação

“O vírus que causa a aids – vírus da imunodeficiência adquirida (HIV) – utiliza RNA como material hereditário. Na sua reprodução, é feita uma cópia de DNA a partir de seu RNA, no interior de uma célula humana. A maquinaria de transcrição normal da célula então produz múltiplas cópias da versão de RNA do vírus.

A maior parte do processo reprodutivo é executada por enzimas supridas pela célula hospedeira, mas o vírus fornece a enzima transcriptase reversa, que produz a versão de DNA do vírus a partir da sua versão de RNA. Essa enzima não costuma estar presente em células humanas, pois seres humanos normalmente não convertem RNA em DNA.

A transcriptase reversa é um dos alvos favoritos dos fármacos anti-HIV. Se ela pode ser inativada por um fármaco, a reprodução viral é interrompida sem quaisquer efeitos colaterais prejudiciais à célula.

Já foram desenvolvidos muitos fármacos contra a transcriptase reversa. [...] A substância 3TC, por exemplo, é uma molécula similar ao nucleotídio citosina (simbolizado por C), um constituinte normal do DNA. A transcriptase reversa do HIV sensível ao fármaco incorpora 3TC em vez de C na cadeia de DNA nascente. A 3TC então inibe a reprodução futura e, assim, impede que o HIV copie a si mesmo.

Um artigo de Schuurman e colaboradores (1995) descreve o que acontece quando pacientes humanos com aids são tratados com 3TC. Inicialmente, a população de HIV no corpo humano decresce bastante. Porém, depois de alguns dias, linhagens de HIV resistentes à 3TC começam a ser detectadas. A frequência do HIV resistente à substância então aumenta. Em 8 de cada 10 pacientes, as linhagens resistentes tiveram a frequência aumentada para 100% da população viral no corpo do paciente dentro de três semanas a contar do início do tratamento com o fármaco (isso levou 7 e 12 semanas nos outros dois pacientes). Essa mudança, de uma população viral que era suscetível à 3TC para uma população viral que era resistente a ela, é um exemplo de evolução por seleção natural.

A evolução acontece no interior do corpo de um ser humano e é excepcionalmente rápida em relação à maioria dos exemplos de evolução. Mas esse processo, observável ao longo de poucas semanas em um paciente com aids, é um microcosmo do processo responsável por muito da diversidade da vida na Terra.

A evolução da resistência a substâncias pode ser acompanhada em nível molecular. A mudança do HIV suscetível à 3TC para o HIV resistente é conseguida pela mudança de um códon no gene que codifica a transcriptase reversa. O aminoácido metionina é trocado por um de três outros aminoácidos. A metionina está em uma parte da transcriptase reversa que interage com os nucleosídios.

Provavelmente, o que está acontecendo é que a transcriptase reversa normal é uma enzima relativamente indiscriminadora, que não distingue entre C e 3TC. A troca torna a enzima mais discriminadora, de modo que ela se liga à C, mas não à 3TC. O vírus pode então se reproduzir na presença de 3TC [...].

O custo da maior discriminação é uma reprodução mais lenta e, por isso, a versão do HIV resistente à 3TC fica em desvantagem quando a substância não está presente. Em sua presença, ela é adaptativa, pois o HIV se reproduz lenta, mas cuidadosamente. Na ausência da substância, o que é adaptativo é uma reprodução mais rápida, de uma maneira menos cuidadosa do ponto de vista molecular.

A resistência no HIV é um dos muitos exemplos nos quais a evolução foi observada em uma pequena escala. [...]”

Fonte: RIDLEY, M. *Evolução*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. A que se refere o termo fóssil? 1. d

a) A ossos petrificados, apenas.
b) A todo organismo que viveu em passado remoto.
c) Aos organismos que surgiram pela evolução de ancestrais remotos.
d) A qualquer vestígio de um organismo que viveu em passado remoto.

2. Como é conhecida a atual teoria da evolução que incorpora os conhecimentos advindos do desenvolvimento da Genética à teoria da seleção natural de Darwin? 2. d

a) Darwinismo.
b) Lamarckismo.
c) Teoria da seleção natural.
d) Teoria sintética da evolução.

3. Em que se baseia o princípio da datação radiométrica de fósseis pelo método do carbono-14 (^{14}C)? 3. b

a) Em detectar presença ou ausência de ^{14}C em uma amostra fóssil.
b) Em estimar a quantidade residual de ^{14}C na amostra fóssil.
c) Em estimar quanto de ^{12}C se transformou em ^{14}C na amostra fóssil.
d) Nas variações que ocorrem na meia-vida do ^{14}C da amostra fóssil.

As frases a seguir referem-se às questões 4 e 5.

I. A adaptação evolutiva resulta do sucesso reprodutivo diferencial.
II. A adaptação resulta da interação dos organismos com o ambiente.
III. A adaptação resulta do uso e do desuso de estruturas anatômicas.
IV. O documentário fóssil sustenta a ideia de que as espécies são fixas.

4. A teoria evolucionista de Darwin admite as ideias expressas em 4. a

a) I e II.
b) I e III.
c) II e III.
d) III e IV.

5. A teoria evolucionista de Lamarck admite as ideias expressas em 5. c

a) I e II.
b) I e III.
c) II e III.
d) III e IV.

6. Considere as afirmações a seguir.

I. Alguns acreditam que o bico longo dos beija-flores surgiu da necessidade de eles alcançarem as glândulas produtoras de néctar no interior de flores tubulares.
II. Alguns admitem que os bicos alongados dos beija-flores surgiram porque as aves que eventualmente nasciam com bicos mais longos tinham mais facilidade de obter alimento e maior chance de sobreviver e deixar descendentes, que herdavam a nova característica.

As interpretações I e II para a origem dos longos bicos dos beija-flores podem ser creditadas a quais teorias, respectivamente? 6. d

a) Criacionismo e lamarckismo.
b) Criacionismo e darwinismo.
c) Darwinismo e lamarckismo.
d) Lamarckismo e darwinismo.

7. Considere as afirmações a seguir.

I. Fósseis são vestígios de seres que viveram no passado.
II. Muitos fósseis são pertencentes a espécies ancestrais das atuais.

Qual teoria aceita essas afirmações? 7. d

a) Apenas o criacionismo.
b) Apenas o darwinismo.
c) Apenas o lamarckismo.
d) Tanto o darwinismo quanto o lamarckismo.

8. Um dos mais preciosos e importantes sítios paleontológicos, com cerca de meio bilhão de anos, foi descoberto em 1909 no alto das Montanhas Rochosas canadenses, no interior do Parque Nacional de Yoho, próximo à fronteira oriental da Colúmbia Britânica. São impressões na rocha de carapaça e das partes moles de diversos tipos de animais invertebrados, o que permite inferir sua organização anatômica. Vestígios como esses são exemplos de 8. b

a) adaptação.
b) fósseis.
c) mimetismo.
d) seleção natural.

9.

> A diversidade de fenótipos existente em uma população, sobre os quais atua a seleção natural, é mantida por mutação e por recombinação gênica.

A frase resume os aspectos fundamentais de qual teoria? 9. d

a) Do criacionismo.
b) Do lamarckismo.
c) Do darwinismo.
d) Da teoria sintética de evolução.

10. "(I) geram variabilidade genética, enquanto (II) é a força responsável pelo direcionamento do processo evolutivo." Qual é a alternativa que completa corretamente a frase? 10. b

a) (I) Mutação gênica e seleção natural; (II) recombinação gênica.

b) (I) Mutação gênica e recombinação gênica; (II) seleção natural.

c) (I) Recombinação gênica e convergência evolutiva; (II) seleção natural.

d) (I) Mutação gênica e recombinação gênica; (II) convergência evolutiva.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

11. Algumas ilhas de Galápagos são habitadas por iguanas, um tipo de lagarto de terra firme que come flores de cactos. Nas ilhas onde esses animais não estão presentes, os cactos são rasteiros e têm flores bem próximas ao chão. Nas ilhas onde vivem as iguanas, os cactos são arborescentes e suas flores ficam no alto, bem distantes do chão. Como é possível explicar, pela seleção natural, o fato de as plantas de cactos serem arborescentes nas ilhas onde vivem as iguanas e rasteiras nas ilhas onde esses lagartos não existem? Escreva um texto objetivo e fundamentado nos conceitos de evolução que aprendeu no capítulo.

12. Desde que os antibióticos começaram a ser empregados em larga escala, logo após a Segunda Guerra Mundial, já foram selecionadas inúmeras linhagens bacterianas altamente resistentes aos mais diversos tipos de antibiótico. O uso indiscriminado de antibióticos deve ser evitado justamente para minimizar o desenvolvimento de linhagens bacterianas resistentes. Pesquise sobre o assunto e escreva um texto curto explicando como ocorre a seleção natural de linhagens bacterianas resistentes. Imagine que você é um agente de saúde e tem que elaborar um folheto informativo, com texto e imagens de fácil compreensão pelo grande público, sobre os riscos populacionais do uso indiscriminado de antibióticos. Aceite esse desafio com um grupo de colegas.

13. Para livrar sua plantação de uma infestação de insetos-praga, um agricultor pulverizou as plantas com determinado inseticida, matando 95% dos insetos. Algumas semanas mais tarde, ocorreu nova infestação e o agricultor fez nova pulverização, com a mesma dose do mesmo inseticida. Dessa vez, conseguiu eliminar apenas metade dos insetos. Baseando-se na seleção natural das formas resistentes, explique por que a pulverização de inseticida não funcionou tão bem como na primeira vez.

14. A imagem de abertura do capítulo mostra um detalhe do afresco feito por Michelangelo no teto da Capela Sistina, em Roma. Pesquise as contribuições de Michelangelo para as diversas áreas do conhecimento e, em especial, o significado da obra ilustrada na página inicial do capítulo. Resuma os aspectos mais interessantes de sua pesquisa em um texto curto e objetivo.

15. O capítulo aborda os principais temas relacionados ao pensamento evolucionista, deixando de lado os embates sobre a origem dos seres vivos entre religião e ciência. Entretanto, aprofundar o conhecimento nessas questões sociais e históricas pode ser muito interessante e esclarecedor. Pesquise a respeito e resuma os aspectos mais interessantes de suas pesquisas em um texto.

16. Retome o trecho do capítulo que fala da influência dos trabalhos de Thomas Malthus para Charles Darwin, em que são mencionados os termos matemáticos "progressão aritmética" e "progressão geométrica". Consulte o material de Matemática e pesquise a que se referem esses termos. Seu primeiro desafio, nesta atividade, é construir um gráfico que mostre as curvas de progressão aritmética e de progressão geométrica para o primeiro termo igual a 2 e a razão da progressão igual a 2. Com a ajuda desse gráfico, redija um texto explicando o que Malthus quis dizer sobre o destino da população humana mundial e os motivos pelos quais ele se equivocou. Comente sobre o contexto em que os termos "progressão aritmética" e "geométrica" foram empregados por Malthus. Pesquise sobre a influência histórica e os equívocos do pensamento malthusiano.

17. Se você observar o gráfico de decaimento radioativo apresentado no texto, verá que ele apresenta os termos de uma progressão geométrica cuja razão é $\frac{1}{2}$. Por exemplo, se partirmos de 1.000 átomos de um elemento radioativo (o primeiro termo da progressão), após o tempo de uma meia-vida do elemento haverá 500 átomos radioativos $\left(1.000 \times \frac{1}{2} = 500\right)$; passado outro intervalo de meia-vida, haverá 250 átomos radioativos $\left(500 \times \frac{1}{2} = 250\right)$; e assim por diante. É essa previsibilidade do decaimento radioativo que permite, a partir da estimativa da porcentagem de isótopos radioativos em uma amostra fóssil, calcular a sua idade. Reflita sobre a importância da interação entre os diversos ramos do conhecimento. Cite ao menos mais um exemplo em que a Matemática, a Química ou a Física ajudam a explicar fenômenos e processos naturais.

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

18. Confecção de modelos: Produzindo "fósseis" em sala de aula

Esta atividade pode ser feita em casa ou em sala de aula e visa ilustrar de forma simplificada o mecanismo de formação de alguns tipos de fósseis (moldes, contramoldes e impressões) pela utilização de materiais como gesso, argila ou massa de modelar.

Material

- argila ou massa de modelar;
- gesso em pó;
- água;
- colheres e facas de plástico;
- tigelas de plástico;
- copos grandes de plástico;
- papel toalha e folhas de jornal;
- martelo de madeira;
- tampas de caixas de sapatos;
- conchas de moluscos;
- folhas de plantas com nervuras bem evidentes;
- pequenos animais de brinquedo feitos de plástico.

Modelo de fossilização I

A primeira providência é forrar o local de trabalho com as folhas de jornal. Em uma tigela de plástico, misture o pó de gesso com água até obter uma massa homogênea e consistente (as embalagens do produto, em geral, trazem a proporção de água a ser adicionada ao gesso). Preencha a tampa de caixa de sapatos com o gesso, alisando a superfície com a faca de plástico; se necessário, pulverize água sobre a superfície do gesso para facilitar o processo.

Coloque com cuidado algumas folhas de plantas e conchas sobre a superfície do gesso, pressionando-as levemente para que deixem sua impressão. Coloque o conjunto em um local protegido do sol direto e da chuva, esperando por algumas horas até o gesso secar. Quando o gesso estiver completamente seco, remova as conchas e as folhas de plantas e observe as marcas deixadas na superfície da peça de gesso.

Tendo em mente que as rochas sedimentares se formam por deposição e compactação de sedimentos ao longo do tempo e que o processo de fossilização na natureza é muito mais demorado e complexo do que o ilustrado nesta atividade, responda às questões.

a) Compare o que foi feito nesta atividade com o que ocorre na natureza. O que representa o gesso usado na atividade?

b) A atividade ilustra "fósseis" do tipo impressão. Em que ambiente pode ter ocorrido esse tipo de fossilização? Justifique.

c) Reflita: como fósseis do tipo impressão foram preservados ao longo do tempo, sem serem destruídos pelas chuvas, calor, ventos e outros eventos naturais?

Modelo de fossilização II

Prepare mais um pouco de gesso, misturando o pó de gesso com água. Despeje a massa de gesso em um copo de plástico até preenchê-lo pela metade. Coloque um animal de brinquedo de plástico no copo e pressione-o sobre o gesso, enterrando-o parcialmente. Despeje mais gesso no copo até cobrir o animal totalmente. Deixe secar.

Quando o gesso estiver completamente seco, rasgue o copo de plástico, desenforme a peça de gesso e quebre-a com uma batida leve do martelo de madeira.

Lembre-se de que, na natureza, sob determinadas condições, os restos soterrados de organismos, depois de deixarem sua impressão gravada na rocha, podem desaparecer completamente. Responda às seguintes questões.

a) Qual o tipo de fossilização simulado na atividade?

b) O que tentamos simular com a quebra da peça de gesso?

Modelo de fossilização III

Preencha uma tampa de caixa de sapatos com uma camada de argila (ou de massa para modelar). Coloque conchas ou os animais de brinquedo de plástico sobre a superfície da argila e pressione-os com força. Remova as conchas e/ou os animais de plástico com cuidado, para não alterar as marcas deixadas no material.

Prepare um pouco de massa de gesso e despeje-a nas depressões da argila. Deixe secar. Retire as peças de gesso.

Sabendo que, na natureza, em certos casos, as substâncias orgânicas do cadáver ou de vestígios sepultados são lenta e gradualmente substituídas por minerais trazidos pela água que, aos poucos, ocupam o lugar das substâncias orgânicas do organismo, responda às seguintes questões.

a) Qual o tipo de fossilização simulado na atividade?

b) O que representam a camada de argila e o gesso?

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFC-CE) A competição por um recurso de disponibilidade limitada é um dos pressupostos do conceito de seleção natural na teoria evolutiva de Darwin. Sobre essa declaração, é correto afirmar que é 1. c

a) verdadeira, pois o conceito de seleção natural do organismo mais bem adaptado pressupõe que os predadores mais eficazes levem suas presas à extinção.
b) falsa, pois apenas a competição interespecífica por um recurso de disponibilidade limitada contribui efetivamente para o conceito de seleção natural.
c) verdadeira, pois apenas em decorrência da competição por um recurso de disponibilidade limitada é que há a seleção do organismo mais bem adaptado.
d) verdadeira, pois tanto a competição intraespecífica quanto a interespecífica são comportamentos que apresentam um alto grau de expressividade gênica.
e) falsa, pois apenas a competição intraespecífica por um recurso de disponibilidade limitada contribui efetivamente para o conceito de seleção natural.

2. (Fuvest-SP) Uma ideia comum às teorias da evolução propostas por Darwin e por Lamarck é que a adaptação resulta 2. c
a) do sucesso reprodutivo diferencial.
b) de uso e desuso de estruturas anatômicas.
c) da interação entre os organismos e seus ambientes.
d) da manutenção das melhores combinações gênicas.
e) de mutações gênicas induzidas pelo ambiente.

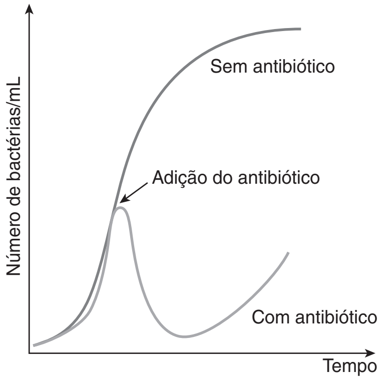
3. (UFC-CE) Um problema para a teoria da evolução proposta por Charles Darwin no século XIX dizia respeito ao surgimento da variabilidade sobre a qual a seleção poderia atuar. Segundo a teoria sintética da evolução, proposta no século XX, dois fatores que contribuem para o surgimento da variabilidade genética das populações naturais são
a) mutação e recombinação genética. 3. a
b) deriva genética e mutação.
c) seleção natural e especiação.
d) migração e frequência gênica.
e) adaptação e seleção natural.

4. (UFPR) A seleção natural é um dos principais fatores responsáveis pela evolução, juntamente com a mutação, a deriva genética e a migração genética. Para que a seleção natural ocorra em uma população, é imprescindível que haja 4. a
a) diversidade da composição genética dos indivíduos da população.
b) alteração do meio ambiente, propiciando o favorecimento de alguns indivíduos da população.
c) informações genéticas anômalas que produzam doenças quando em homozigose.
d) disputa entre os indivíduos, com a morte dos menos aptos.
e) mutação em taxa compatível com as exigências ambientais.

5. (Enem-MEC) O que têm em comum Noel Rosa, Castro Alves, Franz Kafka, Álvares de Azevedo, José de Alencar e Frédéric Chopin? Todos eles morreram de tuberculose, doença que ao longo dos séculos fez mais de 100 milhões de vítimas. Aparentemente controlada durante algumas décadas, a tuberculose voltou a matar. O principal obstáculo para seu controle é o aumento do número de linhagens de bactérias resistentes aos antibióticos usados para combatê-la. Esse aumento do número de linhagens resistentes se deve a 5. b
a) modificações no metabolismo das bactérias, para neutralizar o efeito dos antibióticos e incorporá-los à sua nutrição.
b) mutações selecionadas pelos antibióticos, que eliminam as bactérias sensíveis a eles, mas permitem que as resistentes se multipliquem.
c) mutações causadas pelos antibióticos, para que as bactérias se adaptem e transmitam essa adaptação a seus descendentes.
d) modificações fisiológicas nas bactérias, para torná-las cada vez mais fortes e mais agressivas no desenvolvimento da doença.
e) modificações na sensibilidade das bactérias, ocorridas depois de passarem um longo tempo sem contato com antibióticos.

Questão discursiva

6. (Uerj) Foram introduzidas em dois frascos, que contêm um mesmo meio de cultura, quantidades idênticas de um tipo de bactéria. Após algum tempo de incubação, adicionou-se, a apenas um dos frascos, um antibiótico estável, de uso frequente na clínica e cuja concentração não se modificou durante todo o experimento. O gráfico a seguir representa a variação do número de bactérias vivas no meio de cultura em função do tempo de crescimento bacteriano em cada frasco.

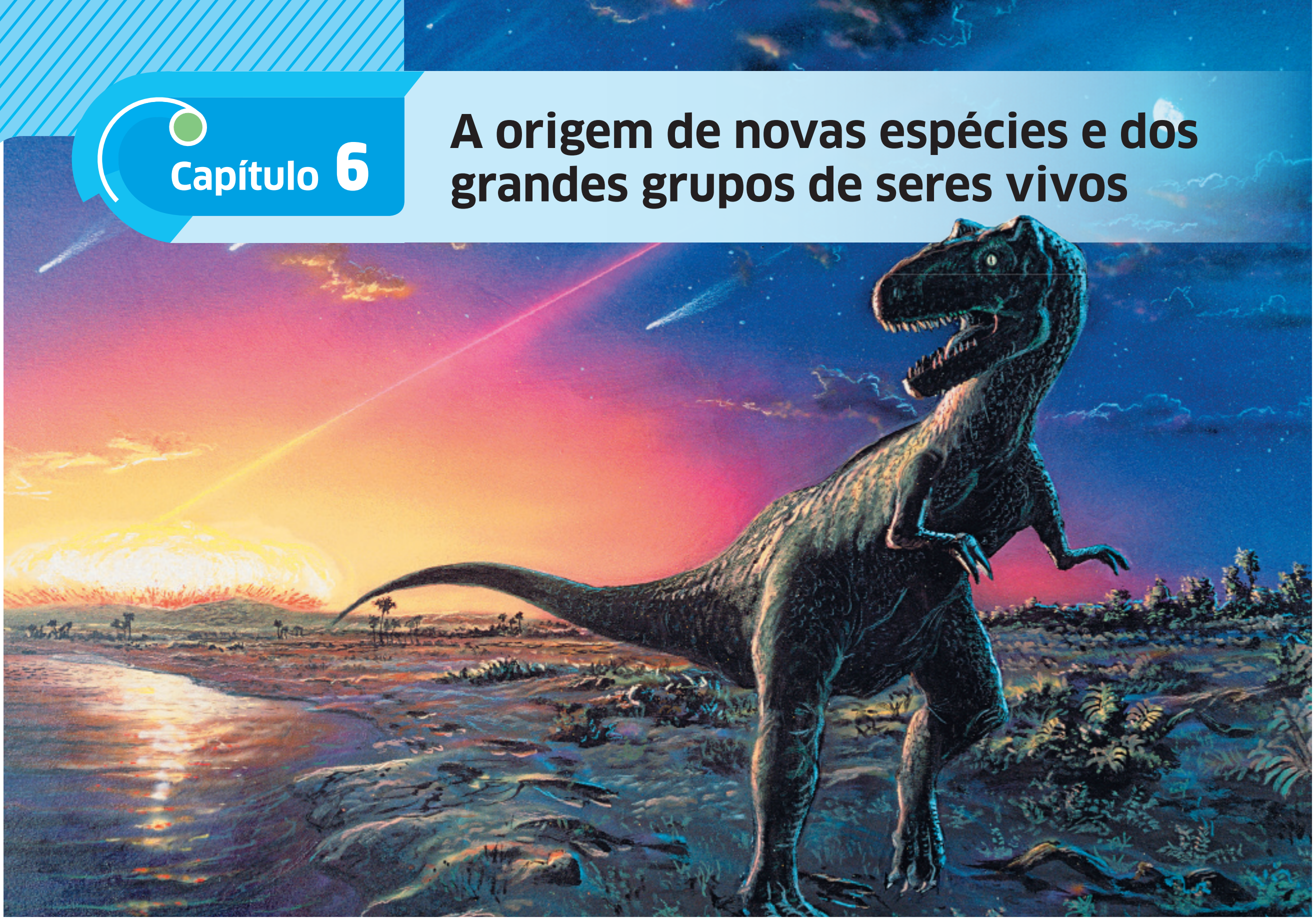


ADILSON SECCO

A observação do gráfico permite concluir que, no frasco em que se adicionou o antibiótico, ocorreu uma grande diminuição no número de bactérias. Utilizando a teoria da seleção natural, explique o fato de essa população ter voltado a crescer após a diminuição observada.

Capítulo 6

A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos



CHRIS BUTLER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Ao reunir informações de diversos campos do conhecimento, como Física, Química, Geologia, Astronomia e Biologia, os cientistas concluíram que a extinção em massa que aniquilou os dinossauros há cerca de 66 milhões de anos foi causada pela colisão de um grande asteroide com o planeta, episódio retratado nessa imagem.

A ciência por trás do evolucionismo

Você acredita em ciência? Quer dizer, acredita que os métodos utilizados pelos cientistas levam, em alguma medida, a compreender as causas e as relações entre os fenômenos da natureza? Você concorda que o conhecimento científico tem possibilitado a criação de tecnologias úteis à humanidade? Finalmente, em sua opinião, o modo científico de pensar e proceder permite fazer previsões acertadas sobre ocorrências naturais?

É muito provável que você tenha respondido sim a pelo menos uma dessas questões. O mundo contemporâneo está repleto de ciência, e essa é a melhor comprovação de que o pensamento científico “funciona”. Entretanto, muita gente esquece que os mesmos pressupostos que norteiam as pesquisas sobre o câncer, por exemplo, estão presentes em todos os outros campos da ciência, como nas investigações que levaram à teoria evolucionista e que continuam a dar sustentação a essa área do conhecimento. Em outras palavras, a ciência que embasa o pensamento evolucionista atual é tão confiável quanto a ciência que tem levado à produção de milhares de tecnologias úteis à humanidade.

O conhecimento científico, no entanto, nunca é definitivo, podendo sempre ser modificado. Quando a evidência dos fatos leva a duvidar de pressupostos científicos então considerados válidos, as explicações vigentes são repensadas e modificadas. Isso tem acontecido repetidamente na história da ciência e é por esse motivo que as explicações científicas que resistem ao tempo e às novas evidências se tornam cada vez mais confiáveis.

Esse é o caso da teoria da evolução. Com base em inúmeras evidências obtidas pela observação da própria natureza e em experimentos de laboratório, os naturalistas e biólogos vêm tentando explicar como a vida surgiu, como a evolução ocorre e qual teria sido a origem dos grandes grupos de seres vivos atuais, com milhões de espécies adaptadas aos ambientes em que vivem.

Sucessivas descobertas em diferentes campos da Biologia, como as advindas das novas tecnologias de investigação do DNA, têm se constituído em contínuos desafios à teoria evolucionista. Ao serem adequadamente explicadas pelo evolucionismo, as novas descobertas passam a apoiá-lo, ampliando seu campo de abrangência; é assim que as teorias científicas se consolidam.

A importância do assunto

A maioria dos biólogos admite a teoria evolucionista moderna como a melhor explicação para a diversidade da vida na Terra. Entretanto, nesse assunto não há unanimidade, uma vez que entram em jogo questões que ultrapassam o âmbito dos fatos naturais e envolvem formação religiosa, moralidade, sentimentos, ética etc.

Para muitos biólogos, não há conflito entre evolução e religião. O pensamento evolucionista atém-se aos fatos observáveis e tenta buscar na própria natureza as explicações para a origem da vida e da diversidade das espécies de seres vivos.

Neste capítulo, estudaremos como teriam surgido as diferentes espécies de seres vivos. Tenha sempre em mente a escala do tempo passado quando se fala na formação de uma nova espécie ou de um novo grupo de seres vivos. A escala do tempo geológico, quando comparada ao nosso tempo de vida, é quase incompreensível em termos concretos. E é exatamente nesses longuíssimos intervalos de tempo que a evolução opera; mudanças evolutivas podem parecer repentinas, mas nem sempre o são, quando levamos em conta a escala do tempo geológico.

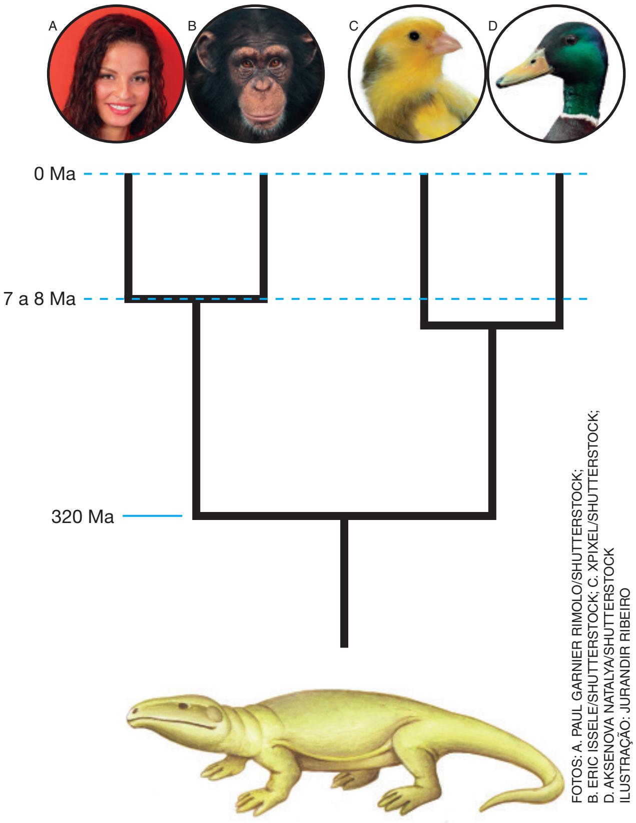
6.1 O processo evolutivo e a diversificação da vida

A árvore filogenética

Ao refletir sobre a origem e a diversificação dos seres vivos, Darwin comparou a história evolutiva da vida a uma árvore: o “tronco” seria representado pelos primeiros seres vivos, que logo teriam se diversificado e originado ramos, correspondentes às novas linhagens de organismos.

De acordo com a teoria evolucionista, o processo de diversificação da vida, que vem acontecendo até hoje em decorrência da adaptação aos diferentes ambientes de um planeta em constante transformação, originou as diversas espécies de seres vivos, tanto as já extintas como as atuais. Cada espécie atual seria comparável à extremidade de um ramo que chega à época presente; os inúmeros ramos mais “curtos”, que não alcançam o topo da árvore evolutiva, corresponderiam às espécies que se extinguiram.

Uma **árvore filogenética**, ou árvore evolutiva, é um diagrama ramificado que indica relações de parentesco evolutivo entre grupos de seres vivos, ou seja, sua filogenia. Ao escolher qualquer espécie atual e “descer” pelo ramo que a originou, chegamos, depois de muitas e muitas bifurcações, ao tronco primitivo ancestral, representado pelos primeiros seres que habitaram a Terra. As bifurcações ao longo do caminho correspondem aos pontos em que novas linhagens se diversificaram, indicando as relações de parentesco evolutivo entre elas. Por exemplo, ao descer pelo ramo evolutivo de nossa própria espécie, chegamos a uma bifurcação, correspondente ao ancestral que originou os chimpanzés, os bonobos e os seres humanos atuais. Acredita-se que essa ramificação da árvore ocorreu entre 7 milhões e 8 milhões de anos atrás. Descendo ainda mais, atingimos a ramificação correspondente à diversificação de uma espécie réptil, semelhante a um pequeno lagarto, que originou as aves e os mamíferos. Supõe-se que essa bifurcação da árvore da vida aconteceu há mais de 300 milhões de anos. (Fig. 6.1)



FOTOS: A. PAUL GARNIER RIMOLO/SHUTTERSTOCK; B. ERIC ISSELE/SHUTTERSTOCK; C. XPIXEL/SHUTTERSTOCK; D. AKSENOVA NATALYA/SHUTTERSTOCK
ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 6.1 Exemplo de árvore filogenética que relaciona aves, como canários e marrecos, e mamíferos, como seres humanos e chimpanzés. Há cerca de 320 Ma, uma espécie de réptil semelhante a um pequeno lagarto teria dado origem às linhagens que originaram as aves e os mamíferos.

Diversificação da vida: anagênese e cladogênese

Como os seres vivos evoluem e se diversificam? Para responder a essa pergunta, precisamos relembrar o capítulo anterior, que explica os fatores evolutivos e as maneiras pelas quais eles interagem no processo de adaptação e evolução das espécies.

Uma população de seres vivos de qualquer espécie é constituída por um conjunto de indivíduos que explora o ambiente e se mantém por meio da reprodução. De acordo com a teoria evolucionista, entre os indivíduos de uma população biológica sempre há diferenças – morfológicas, bioquímicas e comportamentais –, e algumas favorecem a adaptação em determinado contexto e situação ambiental. Por meio da seleção natural, indivíduos dotados de características mais adaptativas tendem a aumentar em frequência na população. E esta, como um todo, adapta-se cada vez melhor à situação ambiental vigente.

À medida que a população de determinada espécie coloniza o ambiente, a seleção natural, atuando sobre as variações genéticas disponíveis, leva ao desenvolvimento de novas características. Em outras palavras, no processo adaptativo, as características dos indivíduos de uma população modificam-se gradativamente no decorrer do tempo, o que torna a população cada vez mais distinta da original. Essa transformação evolutiva de uma linhagem de seres vivos ao longo do tempo é o que se denomina **anagênese** (do grego *aná*, movimento de baixo para cima, e *génesis*, origem), ou modificação filética.

Em determinados estágios da evolução de uma espécie, grupos populacionais podem se isolar uns dos outros e, modificando-se independentemente, dar origem a novas espécies com o passar do tempo. O evento evolutivo em que duas populações se separam e se diferenciam em duas novas espécies é denominado **cladogênese** (do grego *kládos*, ramo, e *génesis*, origem). (Fig. 6.2)

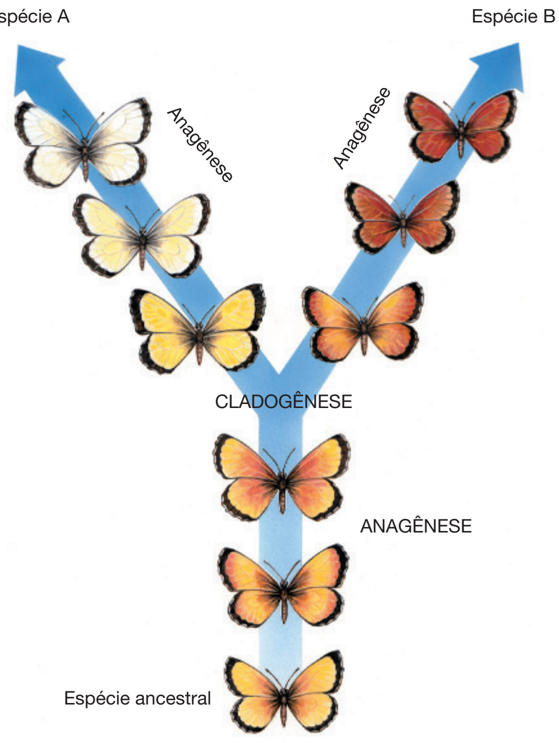


ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 6.2 Representação esquemática dos processos evolutivos de cladogênese e de anagênese. Cladogênese é o evento evolutivo que resulta na divisão de uma linhagem em duas outras, e anagênese é a evolução adaptativa dentro de uma mesma linhagem.

Vale a pena relacionar a cladogênese – processo de formação de duas espécies por diversificação de uma espécie ancestral – com a cladística. Lembre aos estudantes que a cladística, uma corrente moderna de classificação biológica, assume a cladogênese como o processo básico de formação de novas espécies.

Conceito de espécie biológica e especiação

O termo “espécie” vem do latim *species* e significa tipo, qualidade. Na linguagem cotidiana, designa tanto organismos vivos como coisas não vivas. No século XVIII, o botânico sueco Carolus Linnaeus, ou Lineu (1707-1778), empregou pioneiramente o termo “espécie” para indicar cada conjunto de seres vivos em que os indivíduos apresentam grandes semelhanças físicas, com um padrão morfológico comum e típico do grupo.

Em 1942, o zoólogo Ernst Mayr (1904-2005) propôs uma definição de espécie utilizada até hoje, apesar de suas limitações. Nessa definição, espécie é um grupo de populações cujos indivíduos são capazes de cruzar entre si e produzir descendentes férteis, em condições naturais, estando reprodutivamente isolados de indivíduos de outras espécies.

Observe que o aspecto fundamental do conceito de **espécie biológica** de Mayr não é a morfologia, mas a capacidade de cruzamento entre seres de mesma espécie e sua incapacidade de cruzar com seres de outras espécies. De acordo com essa definição, ainda que pertençam a populações geograficamente isoladas, os membros de uma espécie poderão cruzar entre si e produzir descendência fértil se forem reunidos em condições naturais.

Uma das limitações do conceito biológico de espécie é não se aplicar a seres que se reproduzem assexuadamente, como bactérias e vírus, entre outros. Embora esses seres possam apresentar processos de mistura de material genético, eles não têm reprodução sexuada, como os organismos eucarióticos.

A formação de novas espécies de seres vivos – fenômeno denominado **especiação** – é uma etapa fundamental do processo evolutivo. De acordo com a linha de pensamento predominante atualmente, as espécies surgem normalmente por cladogênese, que tem início com a diversificação de populações de uma espécie ancestral, as quais se mantêm isoladas no território, o que se denomina **isolamento geográfico**.

Em ambientes distintos, a seleção natural atua de forma diferenciada sobre as populações isoladas, conduzindo cada uma delas a uma adaptação particular. Depois de algum tempo, os processos de anagênese que atuam sobre cada população isolada podem levá-las a se tornar tão diferentes em termos genéticos que a reprodução entre elas já não é mais possível, mesmo que o isolamento geográfico deixe de existir. Nesse estágio, as populações passam a apresentar **isolamento reprodutivo** e constituem duas novas espécies, originadas por cladogênese da espécie original.

O modo de especiação que admite o isolamento geográfico como fator primordial do processo costuma ser denominado **especiação alopátrica** (do grego *állos*, outro, diferente, e do latim *patria*, lugar de nascimento), para distingui-lo de um tipo de especiação que ocorre sem necessidade de isolamento geográfico, denominada **especiação simpátrica** (do grego *sún*, juntos, e do latim *patria*, local de nascimento). (Fig. 6.3)

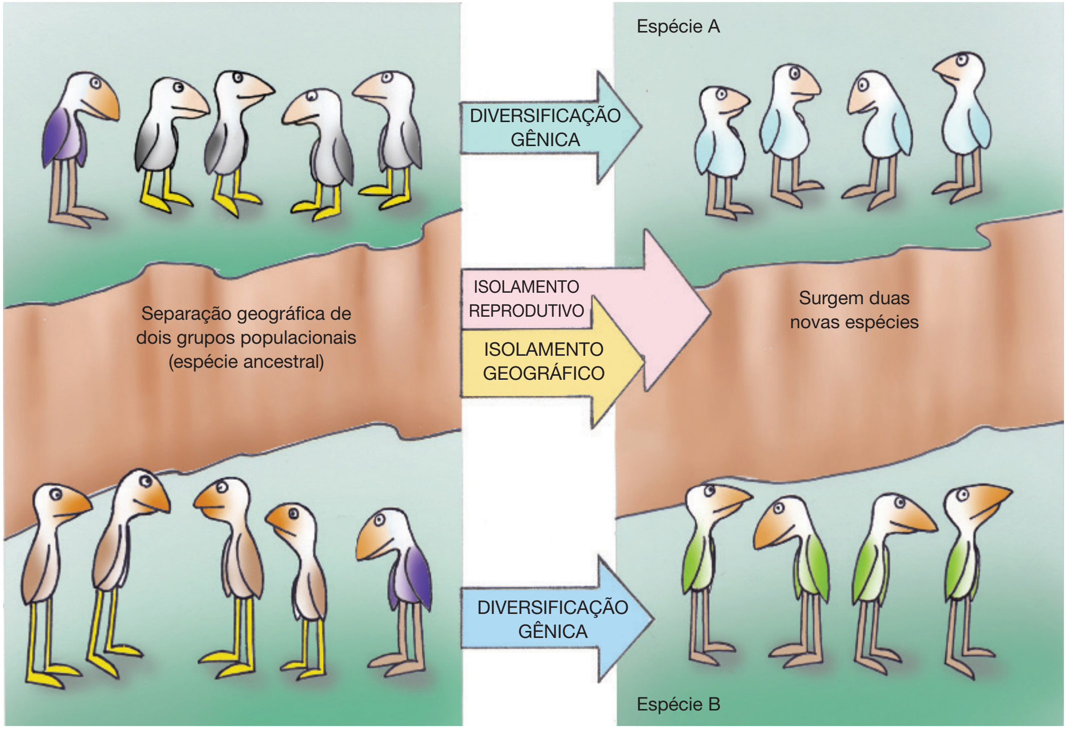


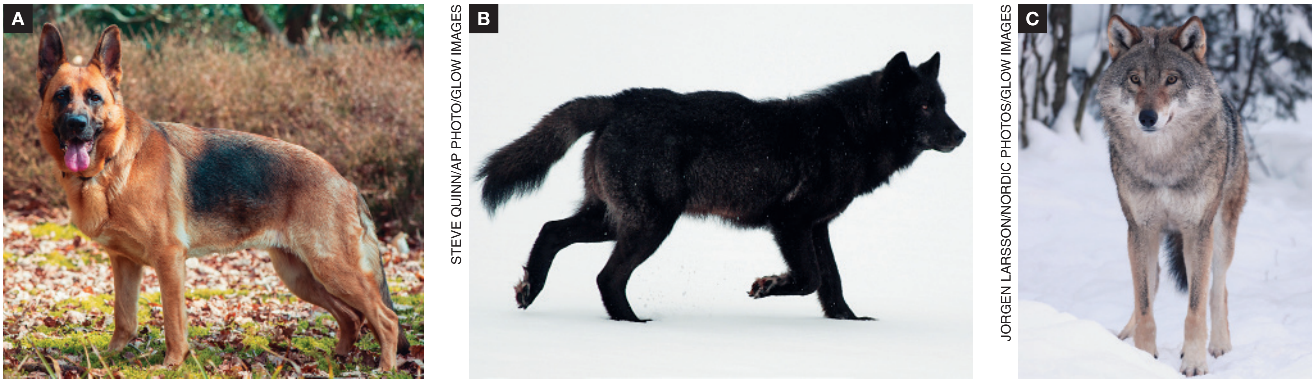
ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 6.3 Representação esquemática do modelo clássico de especiação alopátrica. O isolamento geográfico bloqueia o fluxo dos genes entre as populações e permite a diferenciação gênica. Pressões seletivas diversificadas acentuam as diferenças. O último passo é o desenvolvimento do isolamento reprodutivo, que bloqueia biologicamente a troca de genes.

Espécies em formação: o conceito de subespécie

Subespécies, ou raças, são populações de mesma espécie que diferem entre si quanto a determinadas características. A distinção entre as subespécies se mantém, em condições naturais, porque os membros das subespécies não se cruzam ou o fazem em frequência muito baixa. Essa dificuldade de cruzamento geralmente se deve a um isolamento geográfico prévio entre as subespécies. Se elas entrarem em contato e seus membros passarem a se cruzar livremente, as diferenças raciais tendem a desaparecer devido à mistura genética.

Como estão relativamente isoladas e adaptadas a ambientes particulares, as subespécies tendem a manter e a acentuar sua identidade. Acredita-se que a formação de subespécies representa uma etapa de transição na origem de novas espécies biológicas. (Fig. 6.4)



MERC67/SHUTTERSTOCK

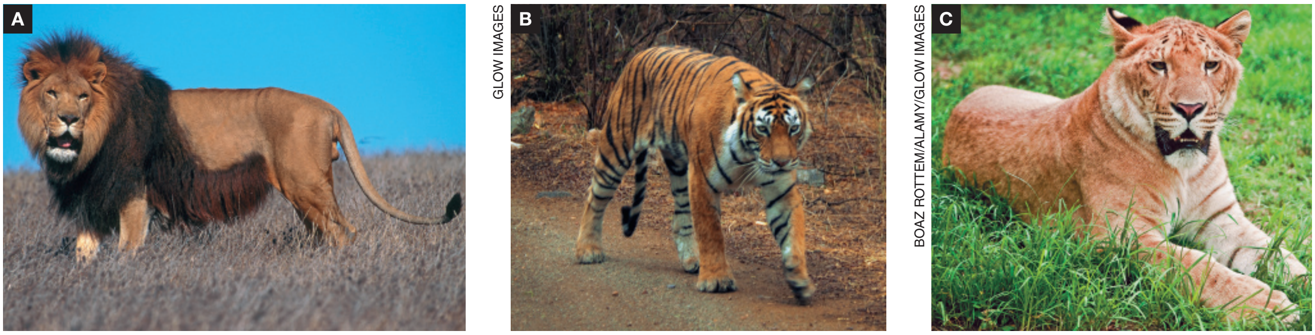
STEVE QUINN/AP PHOTO/GLOW IMAGES

JORGEN LARSSON/NORDIC PHOTOS/GLOW IMAGES

Figura 6.4 Os especialistas reconhecem cerca de 32 subespécies de *Canis lupus* – o lobo –, que diferem entre si em diversas características, como tamanho corporal, cor da pelagem, tamanho e forma do crânio, tamanho das orelhas e espessura dos dentes molares. **A.** Os cães domésticos são considerados atualmente uma subespécie de lobo, denominada *Canis lupus familiaris*. Na imagem, um cão da raça pastor alemão, cujo corpo mede cerca de 80 cm de comprimento, sem considerar a cauda. **B.** *Canis lupus ligoni*, o lobo do Alasca, animal com cerca de 1 m de comprimento. **C.** *Canis lupus lupus*, conhecido como lobo da Europa e de florestas da Rússia, animal com aproximadamente 1,5 m de comprimento.

Tipos de isolamento reprodutivo

Em certos casos, os membros de duas espécies não se cruzam simplesmente porque vivem em hábitats diferentes; fala-se, então, em **isolamento de hábitat**. Esse tipo de isolamento ocorre, por exemplo, entre leões e tigres. Em condições de cativeiro, esses animais podem se cruzar e produzir descendentes, em alguns casos férteis. Isso não acontece na natureza porque essas duas espécies vivem em hábitats distintos: os leões nas savanas, e os tigres nas florestas. Entretanto, esse não é o único fator de isolamento entre as duas espécies, pois a maioria dos híbridos entre leões e tigres é estéril. Além disso, para que o cruzamento ocorra em cativeiro, os animais precisam se adaptar artificialmente à presença um do outro, o que certamente não aconteceria na natureza. (Fig. 6.5)



SUPERSTOCK/GLOW IMAGES

GLOW IMAGES

BOAZ ROTTEM/ALAMY/GLOW IMAGES

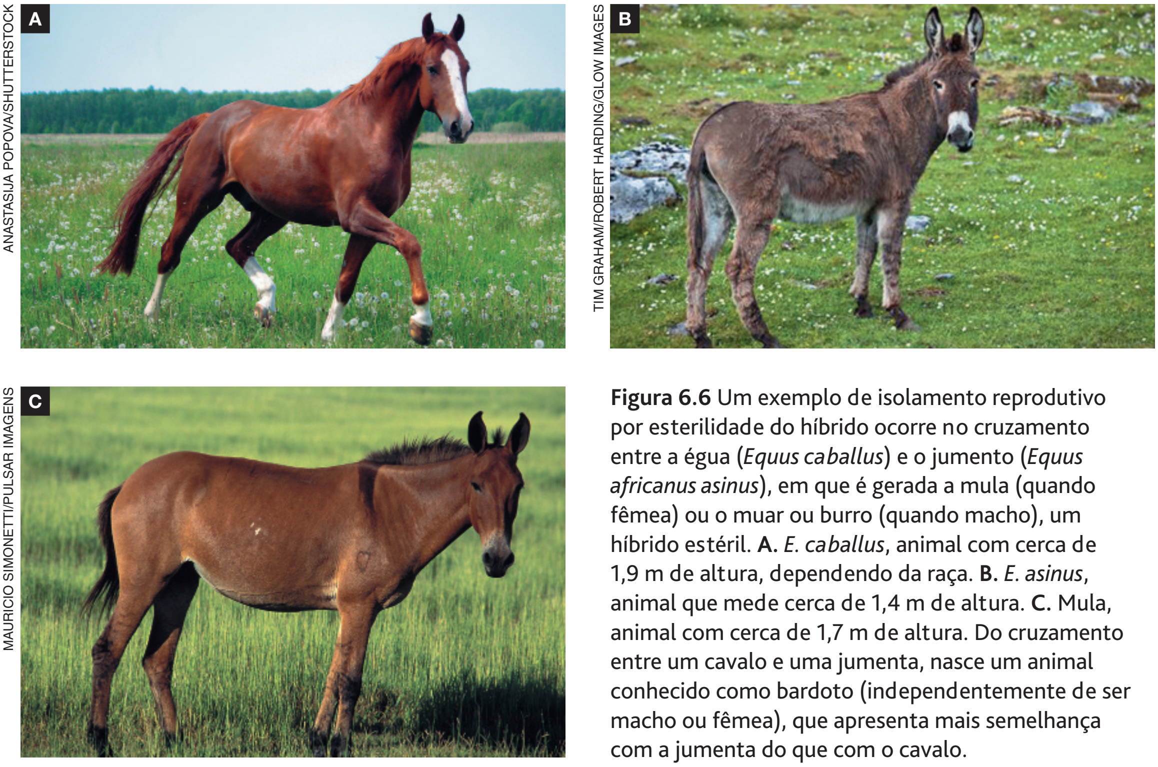
Figura 6.5 Leões e tigres pertencem ao mesmo gênero (*Panthera*) e a espécies distintas, mas podem se cruzar em cativeiro. **A.** Leão (*Panthera leo*), animal que chega a medir cerca de 2,5 m de comprimento, sem considerar a cauda. **B.** Tigresa (*P. tigris*), que mede cerca de 2,6 m de comprimento. **C.** Ligre, híbrido obtido pelo cruzamento em cativeiro entre um leão e uma tigresa. Esse animal geralmente é estéril e pode chegar a 4 m de comprimento.

Em certos casos, os membros de duas espécies não se cruzam porque seus períodos de reprodução não coincidem. Fala-se, nesse caso, em **isolamento sazonal**, ou estacional. Por exemplo, há espécies de aves que habitam a mesma região, mas não se acasalam porque seus períodos de reprodução ocorrem em épocas diferentes. O mesmo acontece com certas espécies de planta cujas flores amadurecem em épocas diferentes do ano.

Há casos em que os membros de duas espécies animais não se acasalam porque seus comportamentos de corte nupcial são diferentes e incompatíveis. Fala-se, nesse caso, em **isolamento etológico**, ou comportamental. A corte nupcial é um fator de fundamental importância na reprodução de diversas espécies animais nas quais a fêmea só aceita o macho depois de um comportamento típico da espécie.

Outro tipo de isolamento reprodutivo, denominado **isolamento mecânico**, deve-se à incompatibilidade estrutural entre as espécies. Isso pode ocorrer tanto em animais, quando a diferença entre os órgãos genitais impede a cópula, como em plantas, quando o tubo polínico não consegue se desenvolver na flor de outra espécie.

Há casos em que os membros de duas espécies copulam e o zigoto chega a se formar, mas o embrião morre prematuramente. Fala-se, então, em **inviabilidade do híbrido**. Por outro lado, em certas espécies forma-se um híbrido até mais forte e vigoroso que os membros das espécies parentais, mas ele é estéril. Fala-se, então, em **esterilidade do híbrido**. A esterilidade geralmente ocorre porque as gônadas se desenvolvem anormalmente ou porque a meiose é anormal. (Fig. 6.6)



ANASTASIJA POPOVA/SHUTTERSTOCK

TIM GRAHAM/ROBERT HARDING/GLOW IMAGES

MAURICIO SIMONETTI/PULSAR IMAGENS

Figura 6.6 Um exemplo de isolamento reprodutivo por esterilidade do híbrido ocorre no cruzamento entre a égua (*Equus caballus*) e o jumento (*Equus africanus asinus*), em que é gerada a mula (quando fêmea) ou o muar ou burro (quando macho), um híbrido estéril. **A.** *E. caballus*, animal com cerca de 1,9 m de altura, dependendo da raça. **B.** *E. asinus*, animal que mede cerca de 1,4 m de altura. **C.** Mula, animal com cerca de 1,7 m de altura. Do cruzamento entre um cavalo e uma jumenta, nasce um animal conhecido como bardoto (independentemente de ser macho ou fêmea), que apresenta mais semelhança com a jumenta do que com o cavalo.

Em geral, diversos mecanismos de isolamento atuam simultaneamente. Em princípio, quanto mais tempo se passa desde a diversificação por cladogênese que originou duas espécies, maiores são as diferenças acumuladas entre elas e, consequentemente, mais eficientes os mecanismos de isolamento. O isolamento reprodutivo mantém cada espécie em sua trajetória evolutiva particular e permite a diferenciação de seu conjunto gênico típico e original.

6.2 A origem dos grandes grupos de seres vivos

O tempo geológico

A história da vida na Terra está inseparavelmente ligada à história geológica do planeta. Ao longo de sua existência, eventos geológicos moldaram os ambientes terrestres e ajudaram a definir os rumos da evolução biológica. A expansão dos seres vivos, por sua vez, também causou profundas alterações nas condições físicas e químicas do planeta. A atmosfera atual da Terra, por exemplo, na qual cerca de 21% do volume corresponde ao gás oxigênio (liberado na fotossíntese), deve sua composição ao aparecimento e à proliferação dos seres fotossintetizantes.

O **tempo geológico**, intervalo que vai desde a origem da Terra até os dias de hoje, é dividido em unidades temporais hierárquicas, estabelecidas com base em eventos geológicos e biológicos ocorridos em diferentes intervalos de tempo. Em ordem hierárquica decrescente, essas unidades são denominadas: **éons**, **eras**, **períodos**, **épocas** e **idades**. Éon é o intervalo mais abrangente e idade, o mais restrito.

A tabela a seguir apresenta algumas das principais divisões do tempo geológico, sua duração aproximada e alguns eventos biológicos marcantes de cada uma delas. Os éons mais antigos – Hadeano, Arqueano e Proterozoico – costumam ser agrupados no intervalo Pré-cambriano, ou Criptozoico (do grego *kryptós*, escondido, e *zoikós*, animal, vida). Esta última denominação deve-se ao fato de as rochas formadas no Pré-cambriano conterem, em geral, microfósseis de difícil detecção. (Tab. 6.1)

TABELA 6.1 PRINCIPAIS UNIDADES DO TEMPO GEOLÓGICO

Éon	Era	Período e subperíodo	Época	Duração (milhões de anos atrás – Ma)	Eventos biológicos marcantes
Fanerozoico	Cenozoica	Quaternário	Holoceno	0 a 0,0117	Extinção em massa dos grandes mamíferos e de muitas aves há cerca de 10 mil anos. Surgimento da civilização humana. Declínio das grandes florestas e considerável extinção de espécies, sobretudo em decorrência da atividade humana.
			Pleistoceno	0,0117 a 2,588	Expansão dos mamíferos de grande porte; aparecimento da espécie humana moderna. Dispersão do *Homo sapiens sapiens* pelo planeta e extinção dos neandertais (*Homo sapiens neanderthalensis*).
		Neogeno	Plioceno	2,588 a 5,333	“Grande intercâmbio americano de fauna”, determinado pelo aparecimento do Istmo do Panamá. Expansão dos hominídeos.
			Mioceno	5,333 a 23,03	Fauna semelhante à atual. Expansão dos campos e diminuição das florestas.
		Paleogeno	Oligoceno	23,03 a 33,9	Expansão das gramíneas. Aparecimento dos macacos antropoides e de muitas famílias de plantas modernas.
			Eoceno	33,9 a 56,0	Aparecimento das ordens modernas de mamíferos. Expansão das aves e de florestas temperadas de angiospermas decíduas.
			Paleoceno	56,0 a 66,0	Diversificação de mamíferos arcaicos e grande aumento da vegetação; aparecimento de mamíferos de grande porte e dos primeiros primatas (prossímios).
	Mesozoica	Cretáceo		66,0 a 145,0 ± 0,8	Abundância de répteis arcossauros. Pequena diversificação de mamíferos placentários e marsupiais. Aparecimento das angiospermas. Final do período marcado pela quinta grande extinção, com desaparecimento de cerca de 75% das espécies, inclusive de todos os dinossauros.
		Jurássico		145,0 ± 0,8 a 201,3 ± 0,2	Abundância de répteis arcossauros; abundância de gimnospermas; aparecimento das aves. Surgimento dos mamíferos placentários e marsupiais.
		Triássico		201,3 ± 0,2 a 252,2 ± 0,5	Aparecimento dos répteis arcossauros (dinossauros, pterossauros, ictiossauros e plesiossauros), dos primeiros mamíferos, das tartarugas e crocodilos e de gimnospermas dos grupos das cicas e dos gincos. Final do período marcado pela quarta grande extinção, com desaparecimento de cerca de 70% a 75% das espécies.

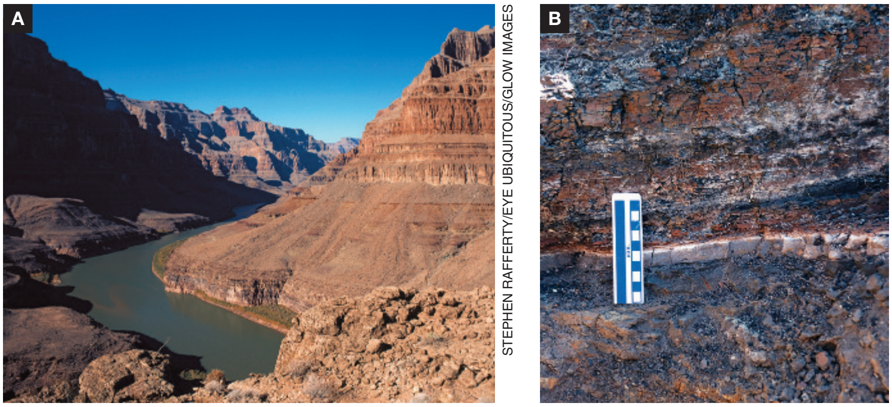
Éon	Era	Período e subperíodo	Duração (milhões de anos atrás – Ma)	Eventos biológicos marcantes
Fanerozoico	Paleozoica	Permiano	252,2 ± 0,5 a 298,9 ± 0,2	Declínio dos anfíbios. Diversificação dos répteis pelicossauros e, em seguida, dos terapsidas. Aparecimento das gimnospermas do grupo das coníferas e da maioria das ordens modernas de insetos. Final do período marcado pela terceira e maior de todas as grandes extinções, com desaparecimento de cerca de 90% a 96% das espécies.
		Carbonífero	298,9 ± 0,2 a 358,9 ± 0,4	Diversificação dos anfíbios (“idade dos anfíbios”); aparecimento dos répteis; expansão dos insetos e de florestas de plantas vasculares sem sementes, semelhantes às pteridófitas, que deram origem aos depósitos de carvão mineral. Ocorrência do “colapso das florestas úmidas do Carbonífero”.
		Devoniano	358,9 ± 0,4 a 419,2 ± 3,2	Expansão das plantas vasculares com formação de florestas; surgimento dos tetrápodes (anfíbios). Abundância de moluscos, de trilobitas e considerável diversidade de peixes dotados de mandíbula (“idade dos peixes”). Final do período marcado pela segunda grande extinção, com desaparecimento de cerca de 70% das espécies.
		Siluriano	419,2 ± 3,2 a 443,4 ± 1,5	Aparecimento das primeiras plantas dotadas de vasos condutores de seiva. Surgimento dos primeiros peixes dotados de mandíbula e grande expansão dos corais. Aparecimento dos artrópodes unirremes (insetos e miriápodes) e dos primeiros animais de terra firme.
		Ordoviciano	443,4 ± 1,5 a 485,4 ± 1,9	Continuidade da diversificação das algas e grande expansão dos invertebrados e dos peixes sem mandíbulas. Aparecimento das primeiras plantas em ambiente de terra firme. Final do período marcado pela primeira grande extinção, com desaparecimento de 60% a 70% das espécies.
		Cambriano	485,4 ± 1,9 a 541,0 ± 1,0	Aparecimento da maioria dos filos existentes atualmente (“explosão cambriana”). Desenvolvimento de conchas e esqueletos mineralizados em muitos animais marinhos: moluscos, equinodermos, trilobitas, braquiópodes etc. Grande expansão dos trilobitas (“idade dos trilobitas”); aparecimento dos vertebrados, representados por peixes agnatos.
Pré-cambriano	Proterozoico Neoproterozoica	Ediacarano	541 ± 1,0 a ~ 635	Grande diversificação dos seres multicelulares.
	Mesoproterozoica Paleoproterozoica		~ 635 a 2.500	Surgimento das células eucarióticas e dos primeiros seres multicelulares: algas coloniais e invertebrados de corpo mole (destituídos de esqueleto). Proliferação dos seres fotossintetizantes com aumento da liberação de gás oxigênio para a atmosfera.

Éon		Era	Período e subperíodo	Duração (milhões de anos atrás – Ma)	Eventos biológicos marcantes
Pré-cambriano	Arqueano			2.500 a 4.000	Aparecimento e evolução das primeiras formas de vida unicelulares nos mares primitivos: arqueas, cianobactérias e bactérias. Aparecimento dos primeiros seres fotossintetizantes com início de liberação de gás oxigênio para a atmosfera.
	Hadeano			4.000 a ~ 4.600	Solidificação da crosta terrestre.

A indicação ± refere-se à faixa de variação estimada dos limites da unidade. (Elaborada com base em International Comission of Stratigraphy, 2012, e Serviço Geológico do Brasil. Disponíveis em: <www.stratigraphy.org> e <www.cprm.gov.br>. Acessos em: mar. 2016.)

As divisões do tempo geológico são definidas em função de mudanças na composição de estratos de rochas, indicativas de grandes eventos geológicos ou paleontológicos, como o surgimento de novas espécies ou as extinções em massa de seres vivos. Por exemplo, o limite entre os éons Proterozoico e Fanerozoico, por volta de 541 milhões de anos atrás (Ma), é marcado pelo aparecimento de fósseis de animais com esqueletos mineralizados; por sua vez, o limite entre os períodos Cretáceo e Paleogeno é marcado por um evento de extinção em massa, ocorrido por volta de 66 Ma, em que desapareceram os dinossauros e muitos outros grupos de seres vivos.

Em 1980, um grupo de pesquisadores formado pelo geólogo Walter Alvarez (1940-), por seu pai, Luis Alvarez (1911-1988, prêmio Nobel de Física em 1968) e pelos químicos Frank Asaro (1927-2014) e Helen Michel (1932-) descobriu que uma camada de rocha depositada no limite entre os períodos Cretáceo e Paleogeno continha grande quantidade de irídio, um metal muito raro em nosso planeta, mas abundante em asteroides e cometas. Essa e outras descobertas subsequentes constituem a mais forte evidência de que a extinção em massa de 66 Ma foi decorrente da colisão de um corpo celeste, cuja desintegração liberou o irídio encontrado na camada rochosa. Mais uma vez, é importante destacar a contribuição de diferentes ramos da ciência na interpretação de fatos e na construção de teorias científicas. (Fig. 6.7)



STEPHEN RAFFERTY/EYE UBIQUITOUS/GLOW IMAGES

FRANCOIS GOHIER/ARDEA/DIOMEDIA

Figura 6.7 A. Sucessão de camadas de rochas sedimentares expostas no Grand Canyon (Arizona, EUA, 2012). Os diferentes estratos ali presentes podem ser distinguidos pela cor, textura, composição química, tipos de fósseis e até mesmo pelo odor. **B.** Corte de uma rocha sedimentar em Wyoming (EUA) evidenciando uma camada clara com altíssima concentração de irídio, cuja origem é atribuída à desintegração do corpo celeste que se chocou com a Terra há 66 milhões de anos, causando a grande onda de extinção do final do Cretáceo.

A vida nos mares primitivos

Precursores da vida

O Pré-cambriano é o mais longo intervalo do tempo geológico, abrangendo cerca de 88% da existência da Terra, desde sua formação até 541 Ma. Os cientistas acreditam que foi no início do Pré-cambriano que surgiram as moléculas precursoras da vida, cuja principal característica era a capacidade de autoduplicação. Essas moléculas teriam originado sistemas complexos, capazes de realizar certos tipos de reações químicas, mobilizando energia para manter sua organização molecular para o crescimento e a multiplicação.

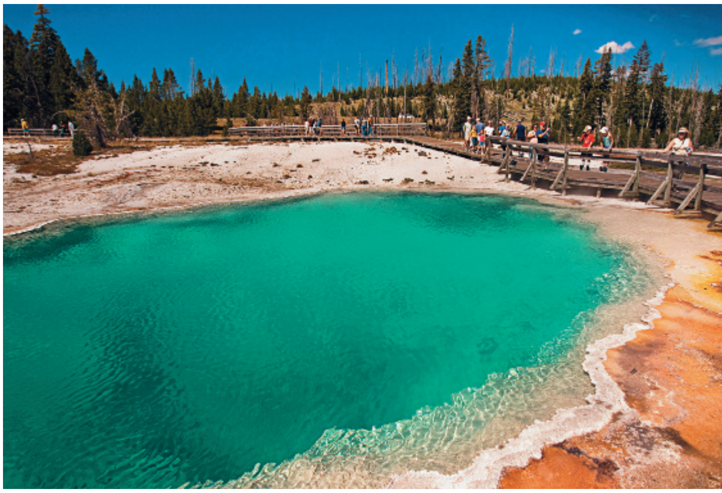
O aparecimento de “sistemas autoduplicativos”, que provavelmente se mantinham isolados do ambiente por um envoltório membranoso, marca o início da história da vida na Terra. Acredita-se que esses sistemas devem ter surgido há mais de 3,5 bilhões de anos e são os ancestrais de todos os seres vivos.

Os primeiros seres vivos eram provavelmente constituídos por uma única célula de estrutura relativamente simples. Os cientistas imaginam que, entre os seres atuais, os mais parecidos com nossos primitivos ancestrais são as arqueas, seres unicelulares procarióticos capazes de viver em ambientes inóspitos, como fontes de água quente, lagos de alta salinidade e pântanos. Acredita-se também que esses ambientes apresentam alguma semelhança com os existentes na Terra primitiva, nos quais evoluíram as primeiras formas de vida. (Fig. 6.8)

Estima-se que a célula eucariótica tenha surgido por volta de 2 bilhões de anos atrás. Há evidências de que as mitocôndrias, presentes em praticamente todas as células eucarióticas, e os plastos, presentes em células de algas e de plantas, descendem de seres procarióticos que invadiram células eucarióticas primitivas e com elas estabeleceram relações amistosas de endossimbiose.

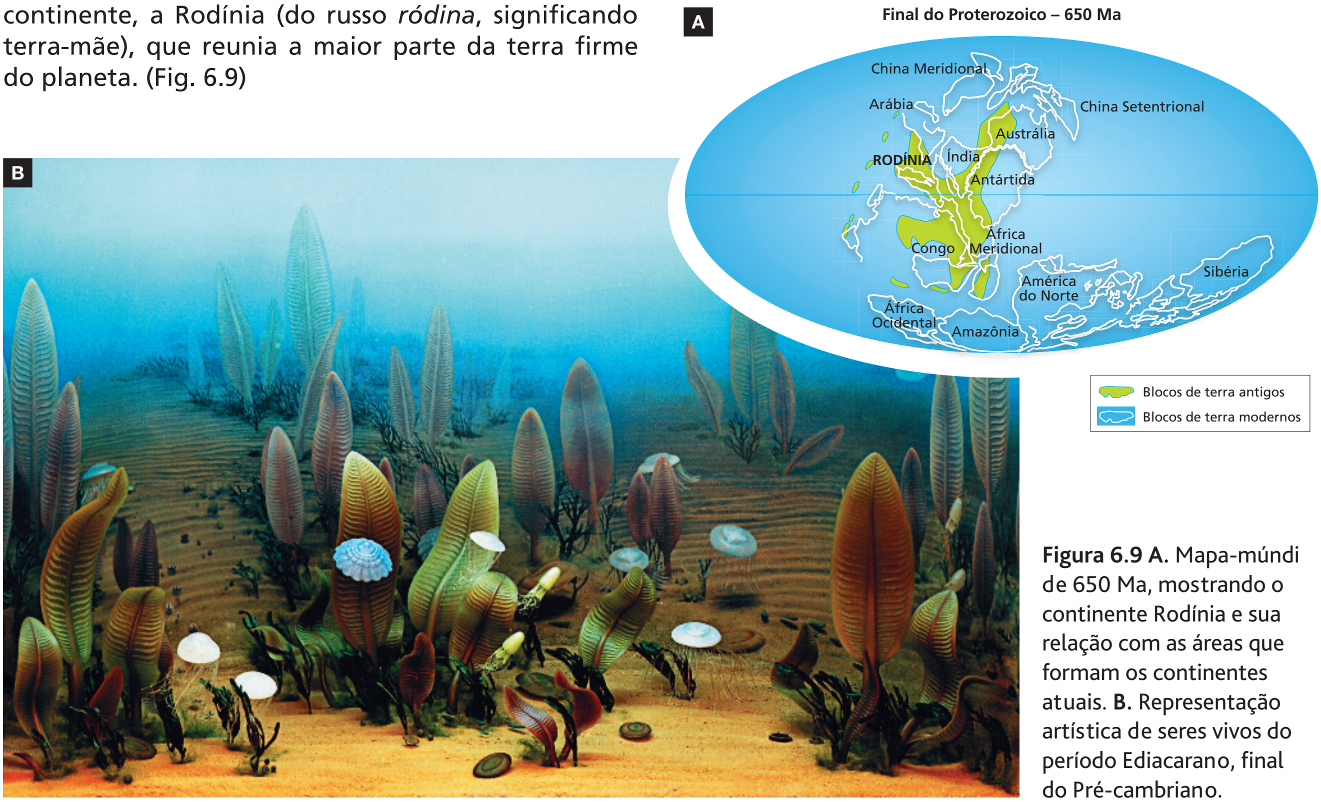
Outro passo importante na história inicial da vida foi o aparecimento dos seres multicelulares. Na estratégia multicelular, células resultantes da multiplicação de uma célula inicial passaram a viver juntas e a dividir tarefas de sobrevivência. Com o tempo, surgiram organismos com células cada vez mais especializadas no desempenho de funções diversas, o que levou ao aparecimento dos tecidos e dos órgãos dos organismos multicelulares.

Os primeiros fósseis de algas filamentosas multicelulares foram encontrados em rochas com cerca de um bilhão de anos. Os mais antigos fósseis de animais invertebrados de corpo mole, alguns semelhantes a águas-vivas e a certos vermes marinhos atuais, datam de cerca de 600 Ma. Nessa época, havia na Terra um único continente, a Rodínia (do russo *ródina*, significando terra-mãe), que reunia a maior parte da terra firme do planeta. (Fig. 6.9)



ROB CRANDALL/ALAMY/GLOW IMAGES

Figura 6.8 Fonte de água quente no Parque Nacional de Yellowstone (EUA, 2007). Nesse ambiente vivem arqueas termófilas, provavelmente em condições similares às existentes há bilhões de anos na Terra primitiva, quando surgiu a vida no planeta.



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

CHASE STUDIO/PHOTORESEARCHERS/LATINSTOCK

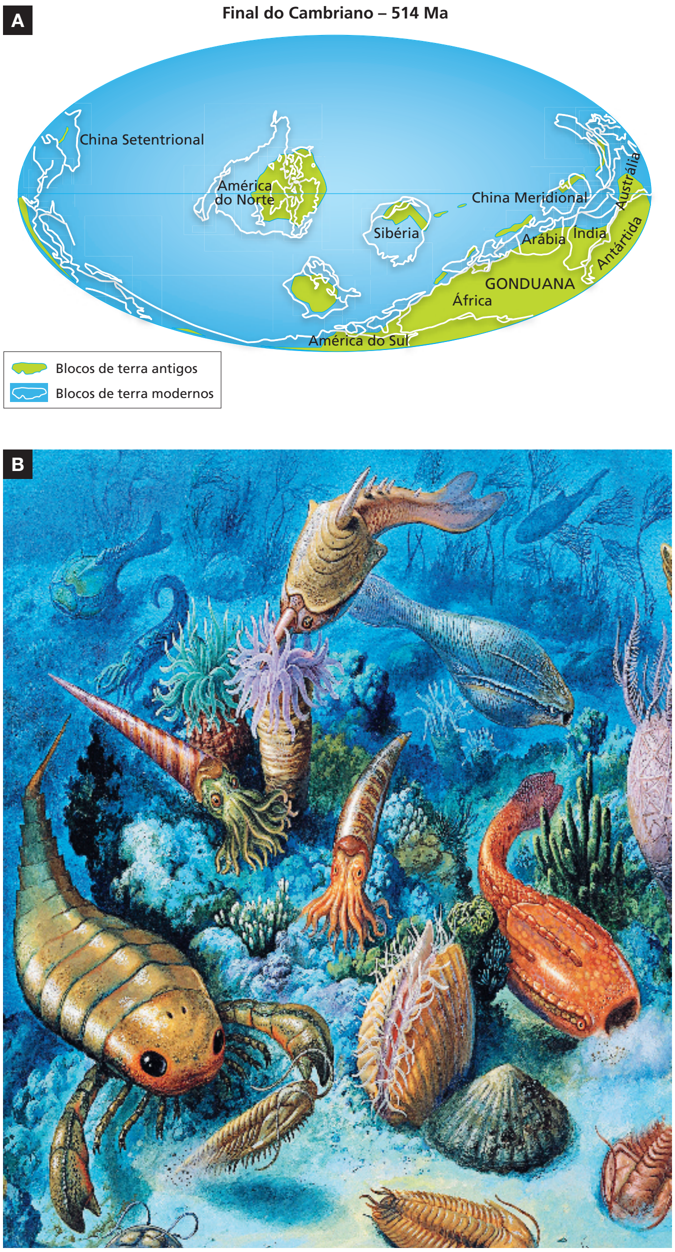
Figura 6.9 A. Mapa-múndi de 650 Ma, mostrando o continente Rodínia e sua relação com as áreas que formam os continentes atuais. **B.** Representação artística de seres vivos do período Ediacarano, final do Pré-cambriano.

A explosão de vida no Cambriano

Há evidências de que, entre o Pré-cambriano e o Paleozoico, ocorreu aumento da temperatura planetária, o que parece ter tornado o ambiente mais favorável à vida, com grande diversificação dos seres existentes. A rapidez e a intensidade com que surgiram os principais grupos de animais, por volta de 530 Ma, levaram os estudiosos a falar em **"explosão cambriana"** para designar a grande diversificação da vida nessa época.

O documentário fóssil do período Cambriano (541,0 Ma-485,4 Ma) revela que, nessa época, os mares eram habitados por muitas espécies de algas multicelulares e de animais invertebrados, entre eles cordados primitivos, que deram origem aos vertebrados. Alguns animais cambrianos apresentavam semelhanças com animais de hoje, de modo que podem ser associados aos filos atuais. Outros, porém, parecem não se relacionar com nenhum dos filos existentes; possivelmente, eles se extinguiram sem deixar descendentes que dessem continuidade à sua linhagem. (Fig. 6.10)

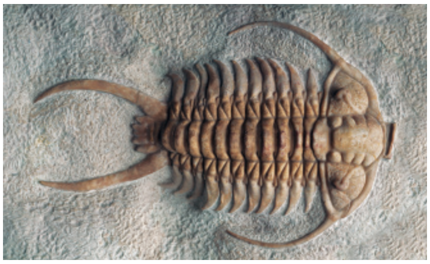
O documentário fóssil mostra que os trilobitas, incluídos entre os primeiros artrópodes, constituíram o grupo de animais primitivos mais bem-sucedido, colonizando amplamente os oceanos durante mais de 270 milhões de anos. Eles teriam surgido por volta de 541 Ma e atingiram sua densidade máxima no início do Cambriano, a "idade dos trilobitas", extinguindo-se ao final da era Paleozoica. (Fig. 6.11)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

CHRISTIAN JEGOU PUBLIPHOTO/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6.10 A. Mapa-múndi de 514 Ma, mostrando os continentes primitivos, originados pela fragmentação de Rodínia, e sua relação com as áreas que formam os continentes atuais. **B.** Representação artística de animais do Cambriano.



SINCLAIR STAMMERS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6.11 Fóssil de trilobita. Esses animais tinham tamanhos muito variados, existindo desde espécies milimétricas até aquelas com mais de 70 cm de comprimento.

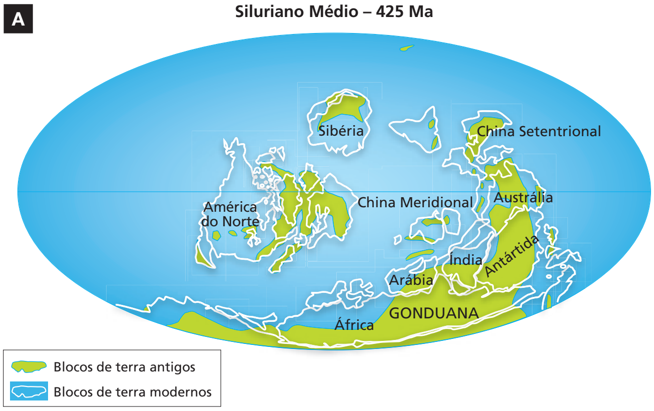
A conquista do ambiente de terra firme

O documentário fóssil mostra que até o período Ordoviciano a vida estava restrita ao ambiente aquático. Antes disso, é possível que houvesse bactérias e algas vivendo em barrancos, às margens de lagos e rios, mas as plantas primitivas parecem ter surgido só por volta de 470 Ma, a partir de um grupo de algas verdes multicelulares dotadas de adaptações que lhes permitiam a sobrevivência fora da água.

Alguns pesquisadores, com base em técnicas de datação molecular e comparações genéticas entre espécies atuais, defendem a ideia de que os primeiros habitantes de terra firme foram fungos, há cerca de 1,3 bilhão de anos. Esses fungos, associando-se a algas e/ou bactérias fotossintetizantes, teriam formado os liquens, que se espalharam pelos continentes. Os mesmos estudos sugerem que as plantas de terra firme podem ter surgido bem antes do que nos revelam os fósseis, por volta de 700 Ma.

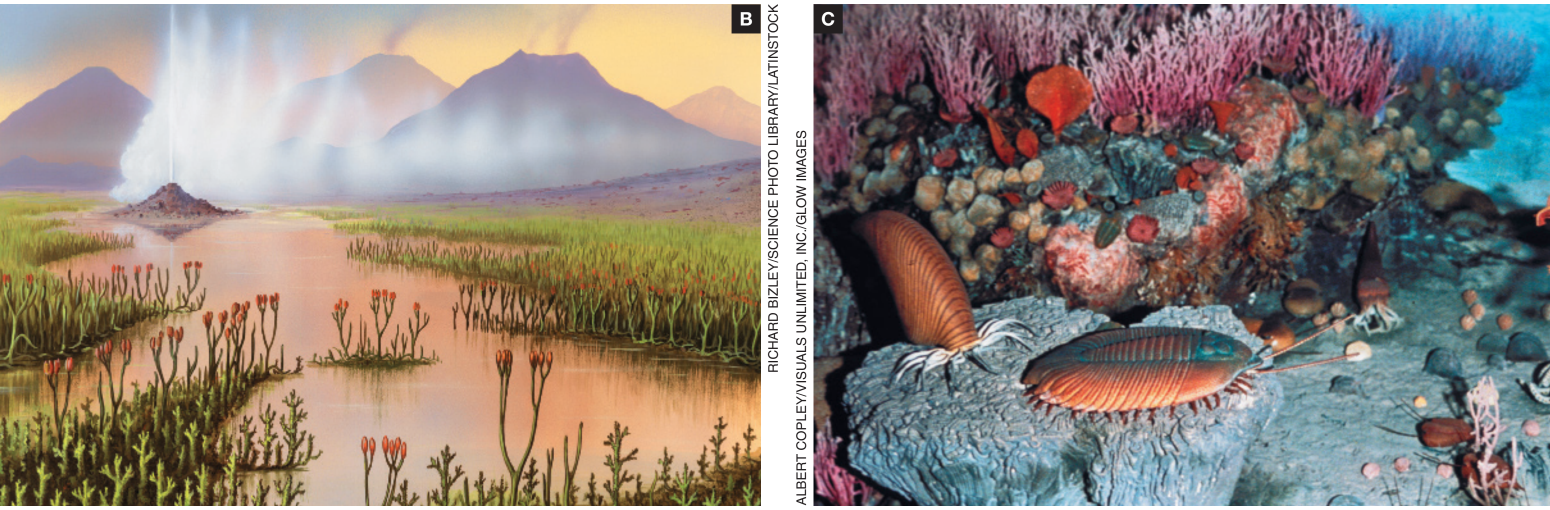
As primeiras plantas de terra firme só se diversificaram em grande escala após uma onda de extinções em massa que marcou a passagem do Ordoviciano para o Siluriano, por volta de 443 Ma. Essa foi a primeira das cinco grandes ondas de extinções na história da Terra e a segunda em proporção, com desaparecimento de 60% a 70% de todas as espécies viventes. Suas causas são desconhecidas, mas sabe-se que, durante o evento, houve grandes glaciações e formação de extensas geleiras, com drástica redução do nível dos oceanos.

No início do Siluriano, a vida voltou a seguir seu curso, com grande diversificação de plantas primitivas de terra firme e de animais aquáticos, remanescentes da extinção em massa ordovício-siluriana. (Fig. 6.12)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

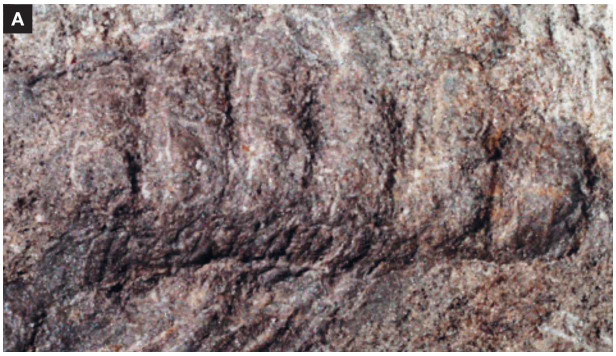
Figura 6.12 A. Mapa-múndi de 425 Ma, mostrando os continentes da época e sua relação com as áreas que formam os continentes atuais. **B.** Representação artística de plantas primitivas de terra firme do Siluriano. **C.** Representação artística de animais de ambiente marinho, sobreviventes da primeira grande extinção em massa de que se tem notícia. Entre esses animais, destacam-se náutilos, braquiópodes, briozoários, crinoides, peixes etc.



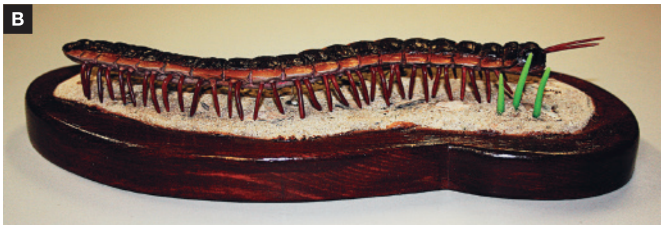
RICHARD BIZLEY/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

ALBERT COPLEY/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

Acredita-se que a colonização da terra firme pelas plantas deu a alguns animais condições de explorar o ambiente seco, que lhes fornecia abrigo e alimento. Tudo indica que os primeiros animais a conquistar o ambiente de terra firme foram artrópodes. O mais antigo fóssil conhecido de animal de terra firme é *Pneumodesmus newmani*, um miriápode que viveu por volta de 428 Ma. (Fig. 6.13)



WIKIMEDIA FOUNDATION, INC./CC BY-SA 2.5/ XENARACHNE/STONEHAVEN TOLBOOTH HISTORY MUSEUM – ABERDEENSHIRE, UK



ANDREW NEWTON/STONEHAVEN TOLBOOTH HISTORY MUSEUM – ABERDEENSHIRE, UK

Figura 6.13 A. Fóssil de *Pneumodesmus newmani*. Esse artrópode primitivo de 1 cm foi descoberto em 2004 pelo caçador de fósseis amador Mike Newman, em Stonehaven, Escócia. **B.** Reconstrução artística do *P. newmani*.

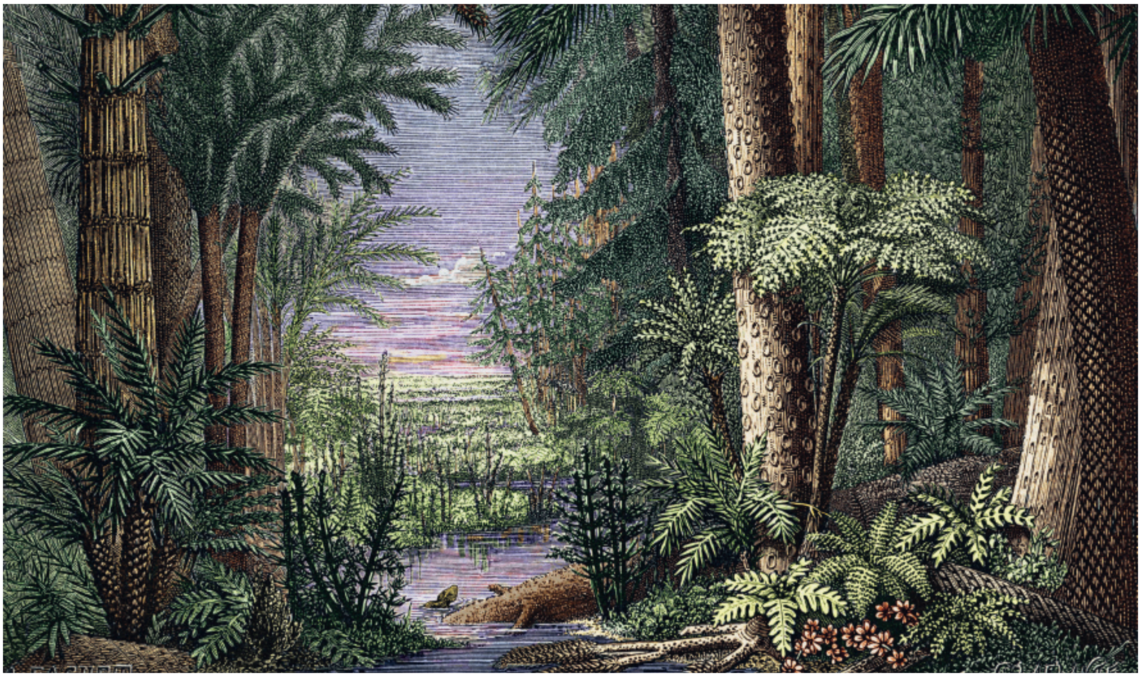
A expansão da vegetação

No período Siluriano, entre 443,4 Ma e 419,2 Ma, surgiram as primeiras plantas dotadas de vasos condutores de seiva, as plantas vasculares. Devido a essa aquisição evolutiva, elas puderam atingir tamanhos maiores, formando as primeiras matas, possivelmente às margens de regiões alagadas. As primeiras plantas vasculares reproduziam-se de modo semelhante às pteridófitas atuais, com gametófitos que dependiam de ambientes úmidos para se desenvolver.

Ao longo do período Devoniano, entre 419,2 Ma e 358,9 Ma, surgiram espécies vegetais cujos gametófitos se desenvolviam sobre o corpo da planta-mãe, formando um tipo primitivo de semente. Essa inovação evolutiva – a semente – foi o passo decisivo para a conquista definitiva do ambiente de terra firme pelas plantas. Ao se tornarem independentes da água líquida para a reprodução, elas puderam se expandir e ocupar locais distantes de regiões alagadas.

Durante o período Carbonífero, entre 358,9 Ma e 298,9 Ma, grandes florestas cobriam os continentes, criando microambientes úmidos e protegidos, favoráveis à vida de insetos e de anfíbios. A vegetação era então composta por pteridófitas com aspecto semelhante a samambaias, licopódios e cavalinhas, porém muito maiores, com alguns metros de altura.

No período Permiano, entre 298,9 Ma e 252,2 Ma, surgiram as primeiras gimnospermas, que apresentavam sementes verdadeiras, mas não frutos. Dessa época até o período Cretáceo, as florestas eram constituídas por pteridófitas gigantes e gimnospermas. Ainda no Cretáceo, apareceram as angiospermas, plantas dotadas de frutos que abrigam as sementes. (Fig. 6.14)



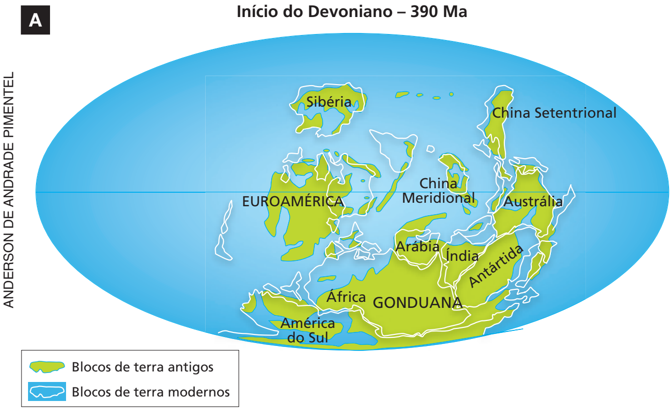
SHEILA TERRY/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6.14 Representação artística de uma floresta do período Carbonífero com base nas evidências fósseis.

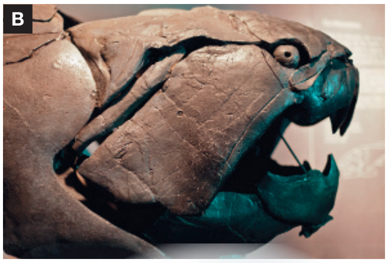
Origem dos tetrápodes

Fósseis descobertos na China nas últimas décadas têm fornecido novas informações sobre a origem de diversos grupos, entre eles o dos vertebrados. Em 2003, uma equipe de pesquisadores da China, Reino Unido e Japão publicou, na revista científica *Nature*, a descrição do fóssil de um pequeno peixe sem mandíbula com cerca de 2,5 cm de comprimento. Segundo o artigo, os animais vertebrados teriam surgido por volta de 525 Ma, durante a “explosão cambriana”.

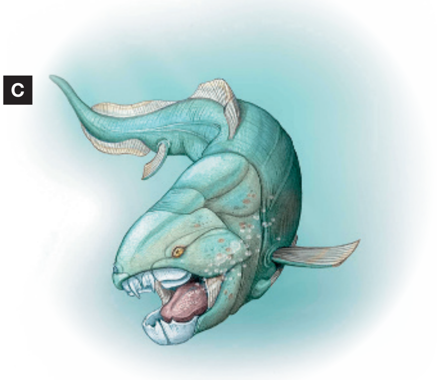
No período Siluriano, uma linhagem primitiva de peixes teria desenvolvido uma novidade evolutiva: a mandíbula. Graças à estrutura esquelética mandibular, que se articula ao crânio e permite abrir e fechar a boca, os peixes dotados de mandíbula adquiriram grande eficiência na captura de alimento. Esses animais diversificaram-se no Siluriano e tornaram-se o grupo dominante nos mares do período Devoniano (419,2 Ma-358,9 Ma), que ficou conhecido como “idade dos peixes”. (Fig. 6.15)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL



NEIL CONWAY/CC BY-SA 2.0/WIKIMEDIA FOUNDATION INC. – ROYAL TYRRELL MUSEUM, DRUMHELLER, ALBERTA, CANADA



CHICAGO TRIBUNE/MCT/GETTY IMAGES

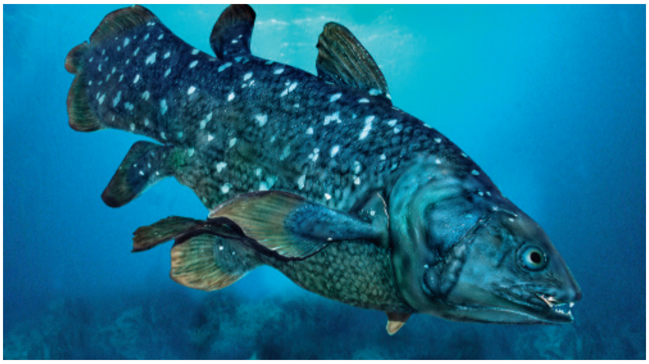
Figura 6.15 A. Mapa-múndi de 390 Ma, mostrando os continentes da época e sua relação com as áreas que formam os continentes atuais. **B.** Fóssil da cabeça de *Dunkleosteus terrelli*, um dos maiores placodermos conhecidos, que podia atingir 10 m de comprimento. Os placodermos receberam esse nome porque tinham a cabeça e o tórax recobertos por placas ósseas articuladas. **C.** Representação artística de *D. terrelli*.

Os peixes ósseos dotados de mandíbulas dividiam-se em dois grupos principais: um com nadadeiras reforçadas por raios cartilaginosos (nadadeiras radiais); e outro com nadadeiras carnosas e dotadas de estrutura óssea de sustentação (nadadeiras lobadas). Os peixes com nadadeiras radiais tiveram grande sucesso evolutivo, e a maioria dos peixes ósseos atuais, os chamados actinopterígios, descende deles.

Peixes com nadadeiras lobadas, denominados sarcopterígios, originaram os animais com quatro pernas, os tetrápodes (do grego *téttares*, quatro, e *poús*, pés, pernas), grupo ao qual pertencem os anfíbios, os répteis, as aves e os mamíferos. Um único representante dos sarcopterígios, o celacanto, sobreviveu até os dias de hoje, e os cientistas o consideram um rélico, por manter características extremamente semelhantes às dos crossopterígios fósseis, grupo de sarcopterígios que viveu há 400 milhões de anos. (Fig. 6.16)

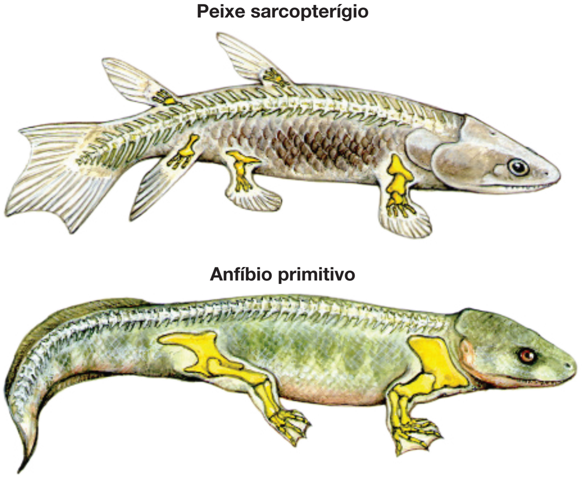
A base carnosa das nadadeiras peitorais e pélvicas dos peixes sarcopterígios primitivos, sustentada por um esqueleto ósseo interno, permitia que eles se apoiassem no solo com as nadadeiras e “caminhassem” pelo fundo de rios e lagos. Esse modo peculiar de movimentação teria permitido aos peixes sarcopterígios realizar incursões à terra firme, em busca de alimento e de aquecimento solar.

Gradativamente, no processo de evolução, foram selecionados os indivíduos com características mais adaptadas ao meio aéreo; suas nadadeiras evoluíram, dando origem a membros semelhantes a pernas. Daí teriam surgido os tetrápodes, entre 408 Ma e 360 Ma. Em uma região ao sul da Polônia, há pegadas fósseis deixadas por um tetrápode primitivo por volta de 397 Ma. Trata-se da mais antiga evidência de um vertebrado de terra firme, 18 milhões de anos anterior aos mais antigos ossos de tetrápodes fossilizados. (Fig. 6.17)



SUPERSTOCK/GLOW IMAGES

Figura 6.16 *Latimeria chalumnae*, espécie de celacanto. Esse animal pode chegar a 2 m de comprimento e cerca de 100 kg de massa corporal. Os celacantos eram considerados extintos até a captura, em 1938, na costa leste da África, de um exemplar da espécie *L. chalumnae*.



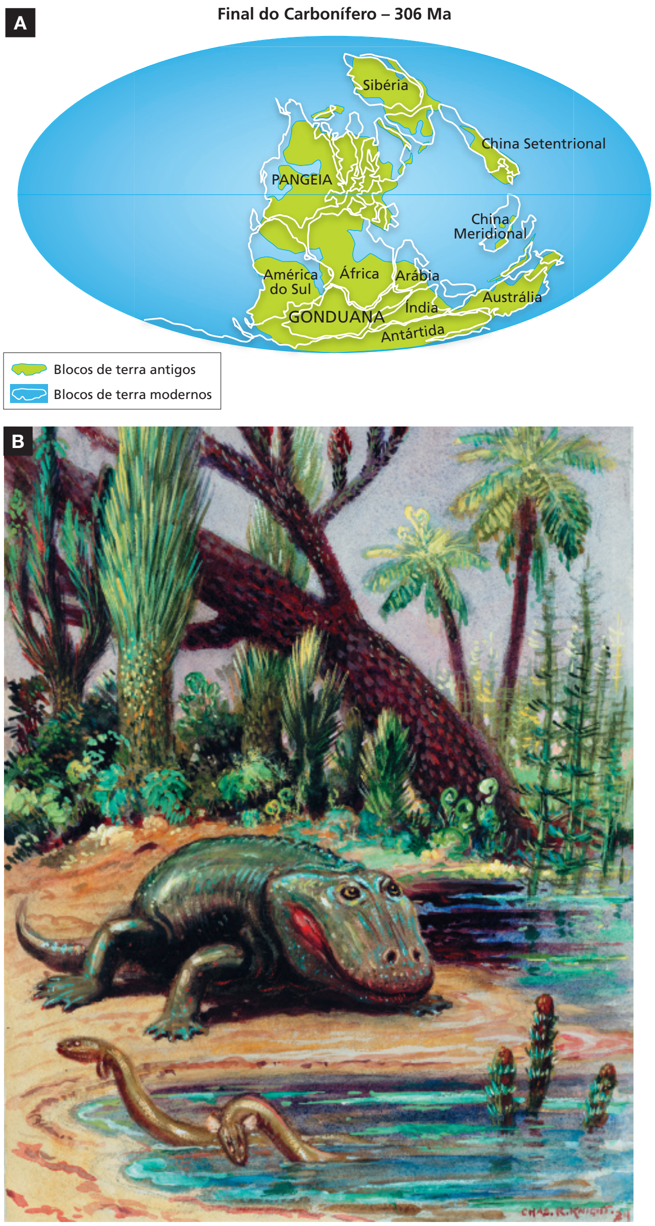
ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Figura 6.17 Representação esquemática comparando os esqueletos das nadadeiras lobadas de um peixe sarcopterígio e as pernas de um anfíbio primitivo. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Breve história dos anfíbios

Acredita-se que os primeiros anfíbios surgiram no período Devoniano, provavelmente a partir de uma linhagem de sarcopterígios. Os anfíbios foram os primeiros vertebrados a habitar a terra firme, mas não a conquistaram totalmente, pois sua reprodução continuou dependente do meio aquático. Ainda hoje, os óvulos e os espermatozoides da maioria dos anfíbios são eliminados na água e a fecundação ocorre fora do corpo da fêmea; o zigoto desenvolve-se em uma forma larval tipicamente aquática, que possui respiração branquial. É somente na metamorfose que esses anfíbios desenvolvem pulmões e adquirem outras características adaptativas à vida em terra firme.

Após o segundo grande evento de extinção em massa, entre 375 Ma e 360 Ma (final do Devoniano), ocorreram grandes mudanças climáticas que contribuíram para a expansão e a diversificação dos anfíbios.



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY/CORBIS/LATINSTOCK

Figura 6.18 A. Mapa-múndi de 306 Ma, mostrando os continentes da época e sua relação com as áreas que formam os continentes atuais. **B.** Representação artística de um cenário típico do período Carbonífero, com anfíbios de 2 m de comprimento e 90 kg de massa corporal; a maior espécie conhecida chegava a ter 9 m.

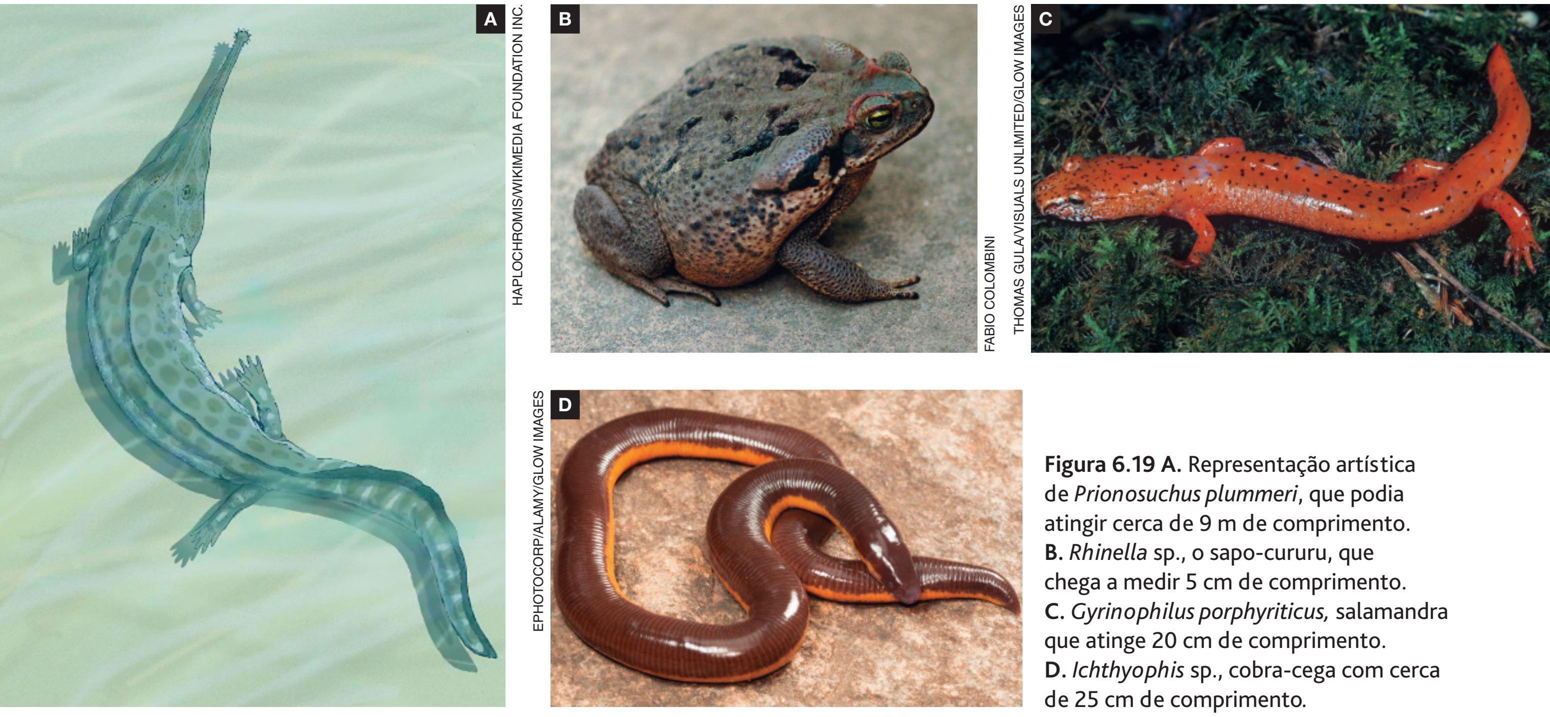
No início do Carbonífero, o clima ficou mais quente e mais úmido, o que permitiu o desenvolvimento de grandes florestas, constituídas de musgos e pteridófitas arborescentes. Isso propiciou a proliferação de artrópodes de terra firme e a abundância de alimento para os anfíbios. Acredita-se que nessa época havia libélulas gigantes que podiam atingir até 65 cm de envergadura.

Por dezenas de milhões de anos – do final do Carbonífero ao começo do Permiano –, os anfíbios foram os animais dominantes em terra firme. Por esse motivo, esse período é conhecido como “idade dos anfíbios”. Algumas espécies anfíbias chegavam a atingir 9 m e eram predadores vorazes. (Fig. 6.18)

O declínio dos anfíbios ocorreu no período Permiano (298,9 Ma-252,2 Ma), sendo atribuído principalmente a mudanças climáticas globais que causaram a aridez da maior parte dos ambientes de terra firme. Uma terceira grande onda de extinção em massa, a maior de todas, aniquilou de 90% a 96% de todas as espécies viventes e pôs fim ao sucesso dos anfíbios.

Um único grupo de anfíbios sobreviveu à extinção e deu origem às três ordens modernas: Anura (rãs, sapos e pererecas), Caudata ou Urodela (salamandras) e Gymnophiona ou Apoda (cobras-cegas ou cecílias). As espécies atuais de anfíbios, cujo tamanho varia entre 7,7 mm da rã da Nova Guiné (*Paedophryne amauensis*) e 1,8 m da salamandra gigante da China (*Andrias davidianus*), têm aspecto bem diferente das espécies pré-históricas, como *Prionosuchus plummeri*, que viveu em terras brasileiras em meados do Permiano. (Fig. 6.19)

Muitos cientistas atribuem a extinção em massa ocorrida entre o Permiano e o Triássico à queda de um asteroide ou cometa, apesar de não ter sido encontrada nenhuma cratera que testemunhe o impacto. Outra explicação para a extinção é a ocorrência de intensa atividade vulcânica, evidenciada por extensas áreas de rochas vulcânicas formadas por volta de 251 Ma em regiões da Sibéria, na Rússia. Alguns cientistas conciliam as duas explicações, admitindo que o impacto de um grande corpo celeste pode ter desencadeado o intenso vulcanismo.



HAPLOCHROMIS/WIKIMEDIA FOUNDATION INC.

FABIO COLOMBINI

THOMAS GULA/VISUALS UNLIMITED/GLOW IMAGES

EPHOTOCORP/ALAMY/GLOW IMAGES

Figura 6.19 **A.** Representação artística de *Prionosuchus plummeri*, que podia atingir cerca de 9 m de comprimento. **B.** *Rhinella* sp., o sapo-cururu, que chega a medir 5 cm de comprimento. **C.** *Gyrinophilus porphyriticus,* salamandra que atinge 20 cm de comprimento. **D.** *Ichthyophis* sp., cobra-cega com cerca de 25 cm de comprimento.

Origem e evolução dos répteis

A conquista definitiva do ambiente de terra firme pelos animais deu-se com o surgimento dos anexos embrionários, que permitiram o desenvolvimento do embrião fora da água. O **ovo amniótico** foi uma importante novidade evolutiva, que contribuiu definitivamente para o sucesso dos répteis, das aves e dos mamíferos, animais reunidos sob a denominação de **amniotas**, referente a âmnio, um dos anexos embrionários.

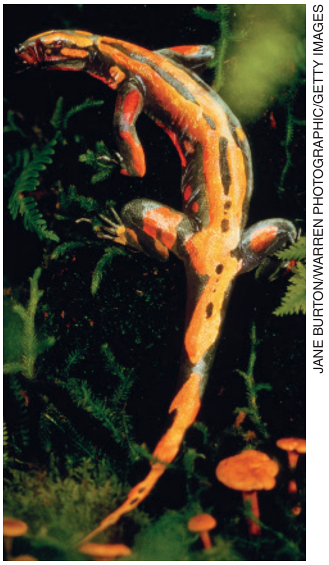
Os répteis surgiram no período Carbonífero, a partir de uma linhagem de anfíbios. Uma série de pegadas encontradas na província de Nova Escócia, no Canadá, em rochas com 315 milhões de anos, é atribuída a *Hylonomus lyelli*, o mais antigo réptil conhecido. Era um animal pequeno e provavelmente muito semelhante a um lagarto moderno. (Fig. 6.20)

Os primeiros répteis tinham pequeno tamanho e importância discreta na fauna, amplamente dominada pelos anfíbios de grande porte. Acredita-se que esse quadro se modificou devido a uma profunda alteração climática, que tornou o clima do planeta extremamente seco, devastando florestas e causando a extinção de muitas plantas e animais. Esse evento, conhecido como “colapso das florestas úmidas do Carbonífero”, ocorreu por volta de 305 Ma, quando grande parte da terra firme do planeta se localizava na região equatorial e era coberta por vasta floresta tropical.

A mudança climática levou à fragmentação da antes extensa área de floresta em pequenas “ilhas” de vegetação, separadas por regiões áridas e inóspitas. Populações de répteis isoladas nessas ilhas de floresta evoluíram independentemente, diversificando-se e aumentando em importância.

Répteis que inicialmente se alimentavam de insetos e de peixes desenvolveram novas estratégias alimentares, diversificando-se em inúmeras espécies, de vários tamanhos e formas corporais. Grande parte do período Permiano (cerca de 40 milhões de anos) foi dominada por um grupo de répteis conhecidos como pelicossauros, com espécies que atingiam 3 m ou mais de comprimento.

Em meados do Permiano, surgiu um grupo de répteis (ordem Therapsida) que se diversificou e se expandiu, substituindo os pelicossauros como o grupo dominante em terra firme. Embora boa parte dos terapsidas tenha sido aniquilada na extinção ocorrida entre o Permiano e o Triássico, o grupo persistiu até o início do período Cretáceo, quando se extinguiu quase totalmente. Uma linhagem sobrevivente de terapsidas deu origem aos mamíferos.

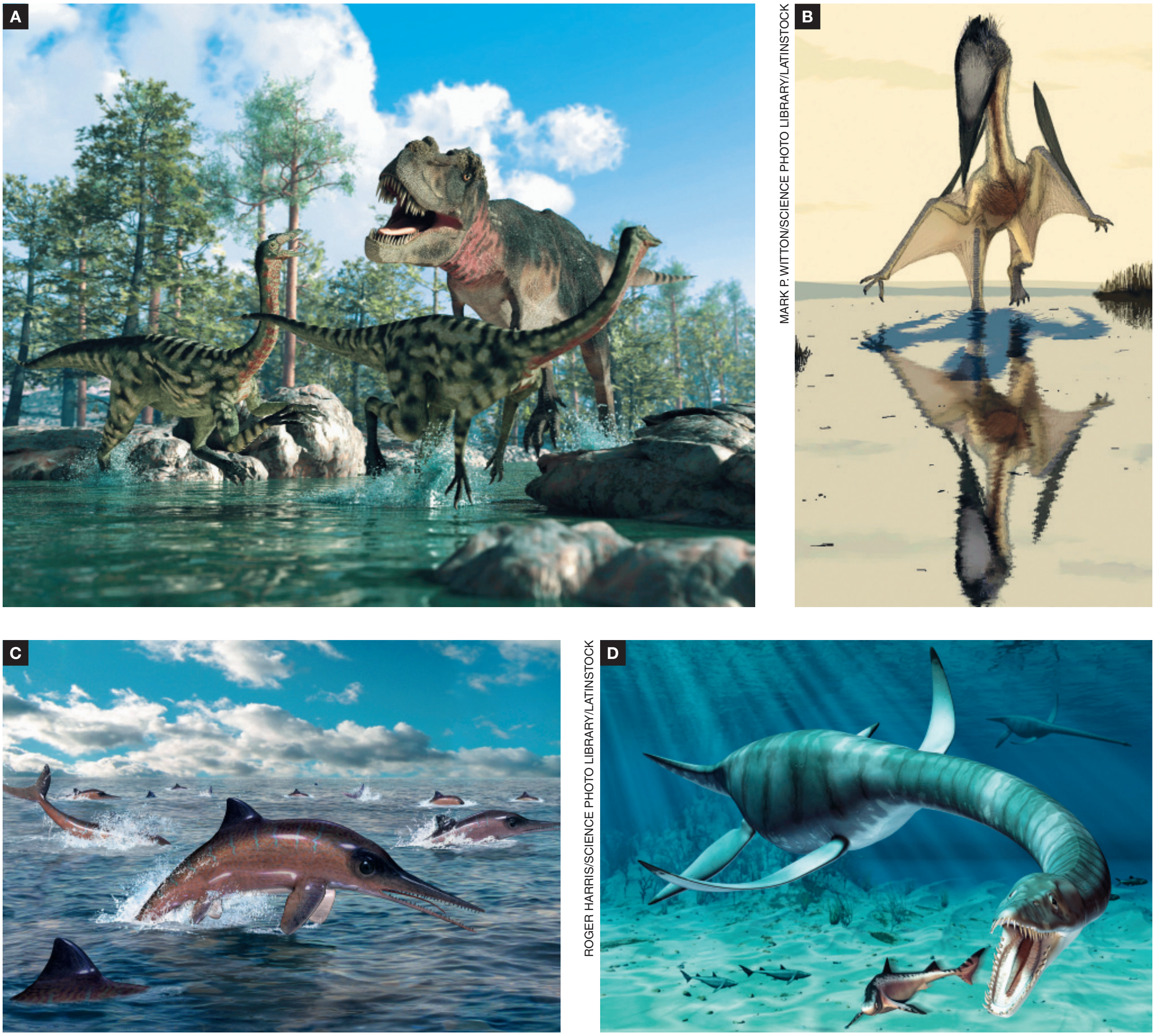


JANE BURTON/WARREN PHOTOGRAPHIC/GETTY IMAGES

Figura 6.20 Representação artística de *Hylonomus lyelli*, réptil que media cerca de 20 cm de comprimento da cabeça à cauda.

A reconstituição de cenários do passado vem sendo amplamente explorada no cinema, na TV e nos diversos meios de comunicação. Exemplo disso foi o sucesso da conhecida série de filmes *Parque dos dinossauros* (*Jurassic Park*); a série trata também da clonagem molecular, técnica usada para dar vida aos dinossauros. Em um dos filmes dessa série, o DNA fóssil de diferentes espécies de dinossauro foi clonado e inserido em ovos de aves atuais. Vale a pena salientar que, embora o argumento seja engenhoso, esse tipo de clonagem não é possível com base nos conhecimentos científicos atuais.

Outra linhagem de répteis, surgida no final do Permiano ou início do Triássico, os arcossauros, rapidamente se tornou o grupo de vertebrados dominante em terra firme. Os arcossauros dividiram-se em quatro grupos principais: os dinossauros (ordens Ornithischia e Saurischia), que ocuparam os ambientes de terra firme; os pterossauros (ordem Pterosauria), que dominaram os ares; os ictiossauros (ordem Ichthyosauria) e plesiossauros (ordem Plesiosauria), que foram predadores de destaque nos mares do Mesozoico. Pelo predomínio desses répteis, a era Mesozoica ficou conhecida como a "idade dos répteis". (Fig. 6.21)



LEONELLO CALVETTI/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

MARK P. WITTON/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

DIOMEDIA – NATURAL HISTORY MUSEUM LONDON, UK

ROGER HARRIS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6.21 Representações artísticas de répteis arcossauros. **A.** Dinossauros das ordens Ornithischia sendo perseguidos por um *Tyrannosaurus rex* (ordem Saurischia), que chegava a medir 6 m de altura. **B.** *Lacusovagus magnificens*, pterossauro cujo fóssil foi encontrado na formação Crato, na Chapada do Araripe, região Nordeste do Brasil. Esse animal, com cerca de 5 m de envergadura, viveu há 115 milhões de anos; apesar do grande tamanho, tinha porte médio se comparado aos outros pterossauros, que podiam atingir de 10 m a 11 m de envergadura. **C.** Ictiossauro, animal que viveu entre 245 Ma e 90 Ma, cujo tamanho podia variar de 1 m nas menores espécies a 23 m nas maiores. (**D**) Plesiossauro, animal que surgiu por volta de 200 Ma e se extinguiu por volta de 66 Ma, cujo tamanho variava de 2 m nas menores espécies a 21 m nas maiores.

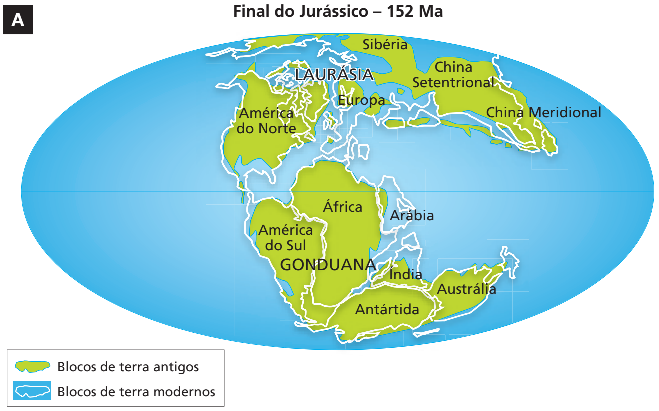
O domínio dos répteis terminou por volta de 66 Ma, por ocasião da última das cinco grandes ondas de extinção em massa, quando desapareceram 75% das espécies viventes, entre elas, todos os dinossauros. Dos répteis restaram apenas tartarugas, crocodilos e lepdossauros, dos quais descendem os lagartos, as serpentes e as tuataras atuais.

Origem das aves

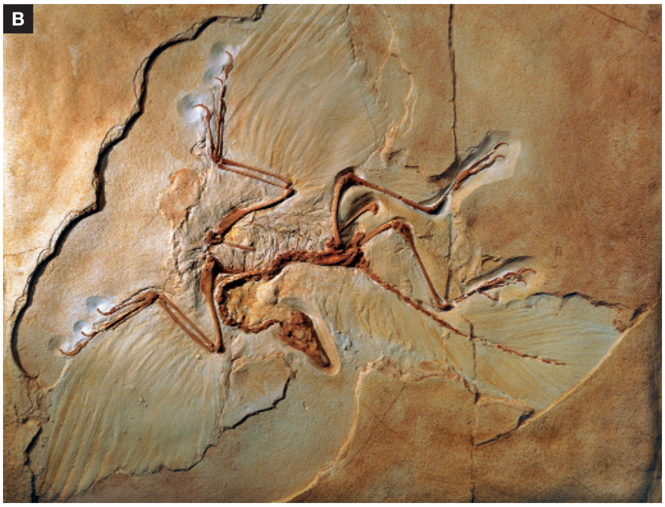
As aves surgiram no período Jurássico, entre 201,3 Ma e 145 Ma, a partir de uma linhagem de dinossauros, e são consideradas remanescentes vivos desses animais. Os especialistas ponderam que aves e répteis atuais, apesar das aparentes diferenças, são essencialmente semelhantes e deviam ser incluídos na mesma categoria taxonômica.

A presença de penas não é um caráter exclusivo de aves: novas descobertas paleontológicas têm revelado que havia diversas linhagens de dinossauros dotadas de penas, entre elas a que originou as aves. É o caso do *Archaeopteryx lithographica*, que viveu no final do período Jurássico, por volta de 150 Ma. Apesar do sucesso causado pela descoberta do primeiro fóssil de arqueópterix no século XIX, ele deixou de ser considerado um ancestral direto das aves. Nos últimos anos, a descoberta de diversos fósseis de dinossauros dotados de penas, principalmente na China, aumenta a controvérsia sobre o grupo ancestral das aves. (Fig. 6.22)

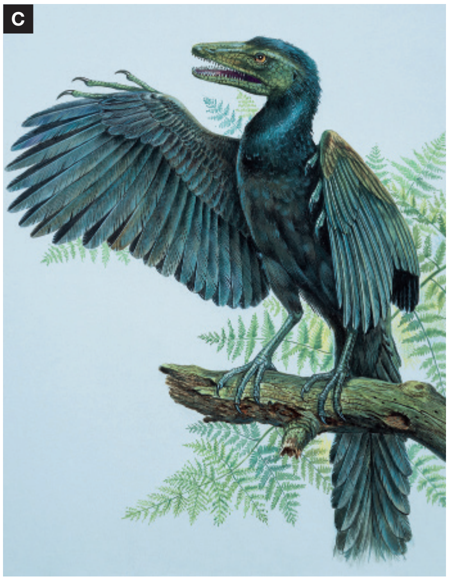
No final do período Cretáceo, as aves apresentavam muitas de suas características atuais. Após a última grande onda de extinção em massa, elas se diversificaram e passaram a explorar com sucesso os ambientes aéreos, de terra firme e aquáticos.



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL



CHRIS HELLIER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK



DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY/DE AGOSTINI/GETTY IMAGES

Figura 6.22 A. Mapa-múndi de 152 Ma, mostrando os continentes da época e sua relação com as áreas que formam os continentes atuais. **B.** Fóssil de *Archaeopteryx lithographica* com 150 milhões de anos, encontrado na Alemanha. **C.** Representação artística de um exemplar do gênero *Archaeopteryx*, que podia atingir 1 m de comprimento e 4 kg de massa corporal. Esse animal diferia das aves por não ter ossos com cavidades preenchidas por ar (ossos pneumáticos), por ter membros e pelve tipicamente reptilianos, além de apresentar dentes e uma longa cauda.

Origem e evolução dos mamíferos

Como já foi mencionado, acredita-se que os mamíferos surgiram por volta de 220 Ma, a partir de um grupo de répteis terapsidas. Os primeiros mamíferos eram animais de pequeno porte, a maioria com menos de 5 cm de comprimento, que se alimentavam principalmente de insetos. Devido à sua boa sensibilidade olfativa e auditiva, os mamíferos primitivos desenvolveram hábitos noturnos, ficando assim menos expostos à predação por répteis. Os hábitos e os pequenos tamanhos dos mamíferos contribuíram para a seleção de características que conferiam avanços no isolamento corporal e na regulação térmica, como o desenvolvimento de pelos e da endotermia, que é a capacidade de manter a estabilidade da temperatura corporal.

Atualmente, admite-se que a linhagem ancestral de mamíferos originou, em um primeiro momento, os **monotremados**, mamíferos ovíparos cujos embriões se desenvolvem dentro de um ovo amniótico e fora do corpo da mãe. Em seguida, teriam surgido os mamíferos marsupiais e os placentários. Nos **marsupiais**, o desenvolvimento embrionário começa no interior do trato reprodutor feminino, mas os embriões saem precocemente do corpo da mãe e se arrastam para uma bolsa externa formada por uma prega de pele – o marsúpio – que abriga os mamilos da fêmea. Ali, os embriões terminam o desenvolvimento alimentando-se de leite. Nos **mamíferos placentários**, o embrião completa seu desenvolvimento no interior do útero materno, recebendo alimento e eliminando excretas pela placenta.

Breve história dos mamíferos monotremados e marsupiais

Os especialistas admitem que os monotremados apareceram por volta de 200 Ma, mas o momento em que teriam surgido os marsupiais e os placentários ainda é motivo de grande controvérsia. Até o final do século XX, o registro fóssil sugeria que essas duas linhagens de mamíferos tinham se separado por volta de 125 Ma; por outro lado, a comparação entre o material genético de espécies viventes levava a supor que a separação era bem mais antiga, por volta de 175 Ma. Recentemente, corroborando a estimativa molecular, encontrou-se um fóssil de mamífero placentário datado em 160 milhões de anos de idade. (Fig. 6.23)

MARK A. KLINGER/CARNEGIE MUSEUM/
DAPD/AP PHOTO/GLOW IMAGES

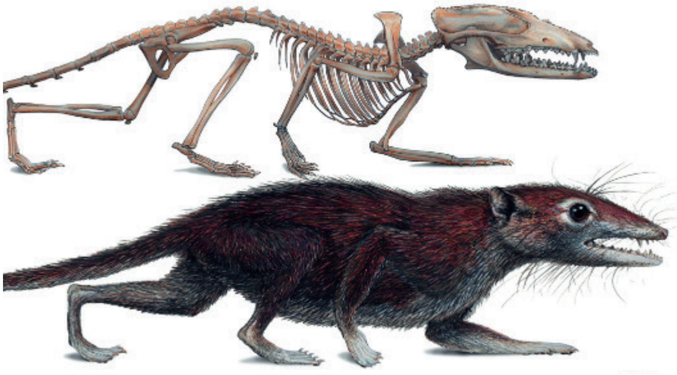


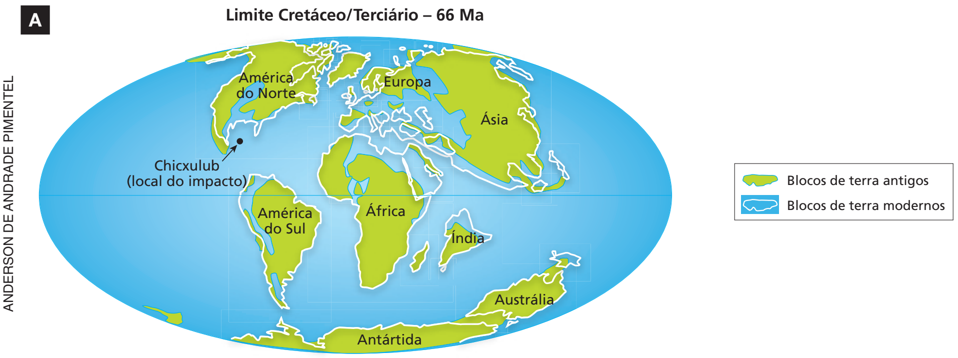
Figura 6.23 Representação artística do esqueleto e do corpo de *Juramaia sinensis*, mamífero placentário insetívoro que viveu por volta de 160 Ma. Esse animal media cerca de 6 cm de comprimento, do focinho ao início da cauda, e tinha aproximadamente 15 g de massa corporal. O fóssil, descrito em 2011 na revista *Nature*, foi encontrado na China, em rochas que datam do período Jurássico.

Os monotremados, representados atualmente por uma espécie de ornitorrinco e por quatro espécies de equidnas, vivem apenas na Austrália e na Nova Guiné, mas é possível que o grupo estivesse amplamente distribuído no início de sua evolução, o que é sugerido por um fóssil de monotremado encontrado na Argentina. A escassez de fósseis desse grupo permite poucas conclusões confiáveis a respeito de sua história evolutiva.

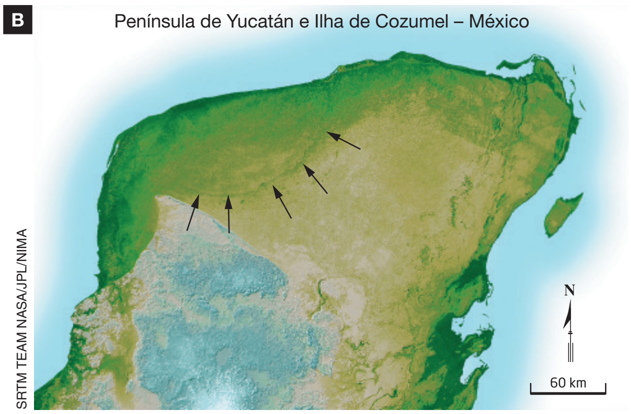
O documentário fóssil de marsupiais, por outro lado, possibilita uma reconstrução histórica bem mais consistente, apesar do local de origem do grupo ainda ser motivo de grandes discussões entre os especialistas. A maioria dos fósseis de marsupiais do Mesozoico tem sido encontrada na América do Norte e na Ásia. O fóssil mais antigo, descoberto na China em 2003, é de um pequeno animal (*Sinodelphys szalayi*) com 15 cm de comprimento e cerca de 30 g, que viveu por volta de 125 Ma.

Marsupiais e placentários floresceram na América do Norte entre 115 Ma e 66 Ma, quando ocorreu a última das cinco grandes extinções em massa, que marca o limite entre o período Cretáceo e o Paleogeno.

A explicação para essa onda de extinção em massa é a queda de um cometa ou asteroide na região de Chicxulub, na península de Yucatán, no México. Acredita-se que a extinção não foi consequência direta do impacto, mas de diversos desdobramentos do evento, como incêndios em escala planetária e meses de escuridão devido à poluição atmosférica, o que exterminou grande parte da vegetação e levou a maioria das teias alimentares ao colapso. Recentemente, novas evidências sugerem que o impacto do asteroide provocou grandes erupções vulcânicas onde é atualmente a Índia, com fortes influências sobre o clima planetário. Foram necessários milhares ou centenas de milhares de anos para o restabelecimento dos ecossistemas, com espécies descendentes das sobreviventes ocupando os nichos vagos. Grupos de seres vivos até então marginalizados, uma vez livres dos competidores, puderam se diversificar e se expandir, mudando dramaticamente o cenário biológico do planeta. (Fig. 6.24)


A
Limite Cretáceo/Terciário – 66 Ma
América do Norte
Europa
Ásia
Chicxulub (local do impacto)
América do Sul
África
Índia
Austrália
Antártida
Blocos de terra antigos
Blocos de terra modernos

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

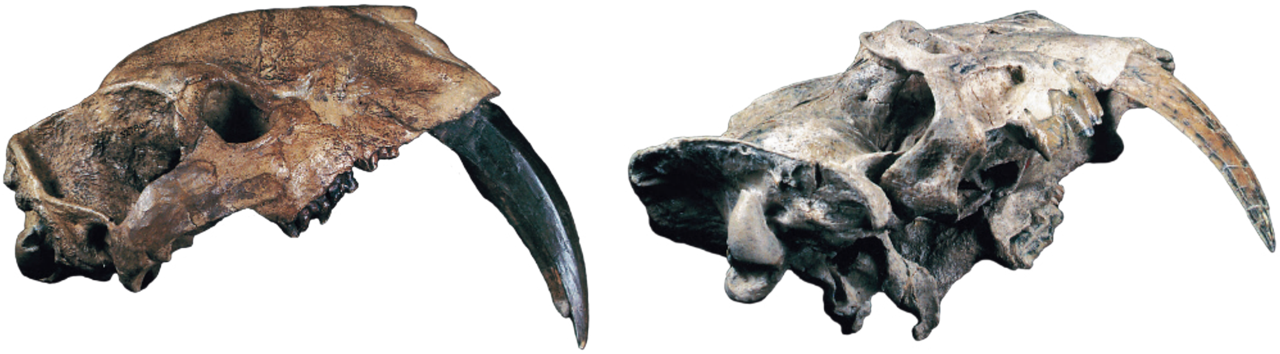

B
Península de Yucatán e Ilha de Cozumel – México
N
60 km

SRTM TEAM NASA/JPL/NIMA

Figura 6.24 A. Mapa-múndi de 66 Ma, mostrando a distribuição dos continentes na época. A seta indica a região de Chicxulub, na península de Yucatán, no México, onde supostamente ocorreu o impacto com o asteroide que causou a extinção dos dinossauros. **B.** Mapa topográfico da península de Yucatán produzido com dados coletados por sistema de radares da Nasa, em 2003. Na parte superior esquerda da imagem, há uma linha tênue em verde-escuro (apontada pelas setas) que indica a borda da cratera provocada pelo impacto do asteroide em Chicxulub.

Há evidências de que no final do Cretáceo os marsupiais se expandiram para a América do Sul. Pouco tempo depois, eles praticamente se extinguiram na América do Norte e na Eurásia.

Na América do Sul, os marsupiais se diversificaram, preenchendo nichos ainda não ocupados por placentários. Um exemplo é o *Thylacosmilus atrox*, marsupial carnívoro com dentes caninos superiores muito longos e que, do final do Mioceno até sua extinção, por volta de 2 Ma, compartilhou o topo dos níveis tróficos com aves predadoras do gênero *Phorusrhacids*. (Fig. 6.25)



FOTOS: SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

Figura 6.25 Crânios fossilizados do marsupial *Thylacosmilus atrox*. Esse animal media cerca de 1,2 m de comprimento.

Por volta de 60 Ma, os marsupiais atingiram a Antártida, que ainda estava ligada à América do Sul e apresentava clima relativamente quente, com áreas de florestas tropicais. Em seguida, pequenos marsupiais vindos da Antártida alcançaram a Austrália, através da ligação que ainda existia entre os dois continentes.

Quando os marsupiais chegaram à Austrália, entre 60 Ma e 55 Ma, as florestas tropicais estavam em expansão, o que permitiu rápida diversificação do grupo, com ocupação dos diversos nichos que se abriam em decorrência da expansão florestal. A separação subsequente da Antártida isolou completamente o continente australiano e impediu a entrada de placentários competidores. Assim, os marsupiais floresceram, diversificaram-se e ocuparam os mais diversos nichos, o que se denomina **irradiação adaptativa**.

Breve história dos mamíferos placentários

A grande extinção ocorrida entre os períodos Cretáceo e Paleoceno, que dizimou os animais de grande porte da superfície terrestre, criou condições para a grande expansão e o sucesso evolutivo dos primitivos mamíferos placentários. Estes eram insetívoros de pequeno porte semelhantes a roedores, onívoros de porte médio, bem como herbívoros e carnívoros de porte maior. (Fig. 6.26)

O início do Eoceno foi marcado por um clima quente e úmido, o que permitiu aumento da vegetação, com florestas desenvolvendo-se de polo a polo do planeta; nessa época, florestas tropicais cobriam o norte da Europa e a América do Norte, com palmeiras crescendo na Groenlândia e no Alasca. Nesse cenário surgiram os primeiros mamíferos placentários modernos, que se espalharam pelo Hemisfério Norte, onde a fauna arcaica estava em declínio.

Os oceanos quentes do Eoceno, repletos de peixes, permitiram a evolução de mamíferos aquáticos, como as primeiras baleias (cetáceos) e os primeiros peixes-bois (sirênios).

Por volta da metade do Eoceno, o clima tornou-se mais frio e mais seco, com significativa redução das florestas em certas regiões da Terra. No clima mais frio, as mudanças estacionais tornaram-se mais marcantes, favorecendo as plantas decíduas, que perdem as folhas no inverno e são, portanto, mais adaptadas às mudanças sazonais. Ao final do Eoceno, o Hemisfério Norte estava coberto por florestas temperadas de árvores decíduas, e as florestas tropicais estavam reduzidas apenas à zona equatorial da América do Sul, da África, da Índia e da Austrália.

Ainda na metade do Eoceno, roedores africanos se expandiram pela América do Sul, ao que tudo indica cruzando, a bordo de “ilhas” de vegetação flutuantes, a pequena distância que separava o Nordeste brasileiro da costa oeste da África. Eles foram os ancestrais das capivaras, chinchilas, porquinhos-da-índia e porcos-espinho. Essa mesma rota foi seguida pouco mais tarde por primatas que deram origem aos macacos do Novo Mundo.

Durante o Oligoceno, ocorreu grande dispersão das plantas gramíneas tanto no Hemisfério Norte quanto no Hemisfério Sul, abrindo novas oportunidades para os mamíferos herbívoros. Na América do Sul, ainda isolada da América do Norte, desenvolveu-se uma fauna de grandes mamíferos placentários, como o gênero *Pyrotherium*, caracterizado por animais semelhantes a elefantes. Na Ásia, vivia o *Indricotherium* sp., maior mamífero de terra firme que já existiu. (Fig. 6.27)

O Mioceno foi uma época quente, tanto em relação ao Oligoceno, que o precedeu, quanto ao Plioceno, que o sucedeu. Áreas com vegetação aberta continuaram em expansão, permitindo a diversificação de mamíferos herbívoros corredores e de seus predadores. Acredita-se que nessa época surgiu na África a linhagem de primatas que daria origem à espécie humana, como veremos com mais detalhes no próximo capítulo.

No Mioceno, a fauna de mamíferos placentários era bem semelhante à atual, de tal modo que, se pudéssemos nos transportar para aquela época, reconheceríamos cavalos, camelos, veados, antílopes, girafas, ursos, hienas, cães, macacos e elefantes, entre diversos outros mamíferos. Exceções eram a Austrália, onde a fauna de mamíferos era composta apenas de monotremados e marsupiais, e a América do Sul, onde, em consequência do isolamento geográfico, continuava a evoluir uma fauna de mamíferos placentários semelhantes a tatus e tamanduás atuais, além de outros.

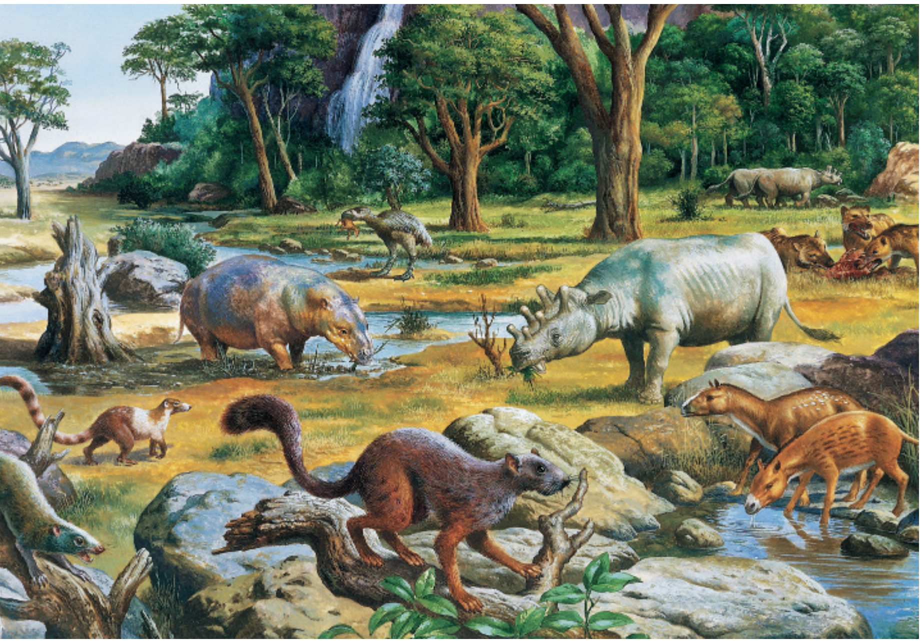

CHRISTIAN JEGOU PUBLIPHOTO DIFFUSION/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6.26 Representação artística de cenário do período Paleoceno. Nessa época, depois da extinção dos grandes répteis, os mamíferos placentários se diversificaram e se expandiram. Havia animais de diversos tamanhos, mas os maiores não ultrapassavam 3 m de altura.

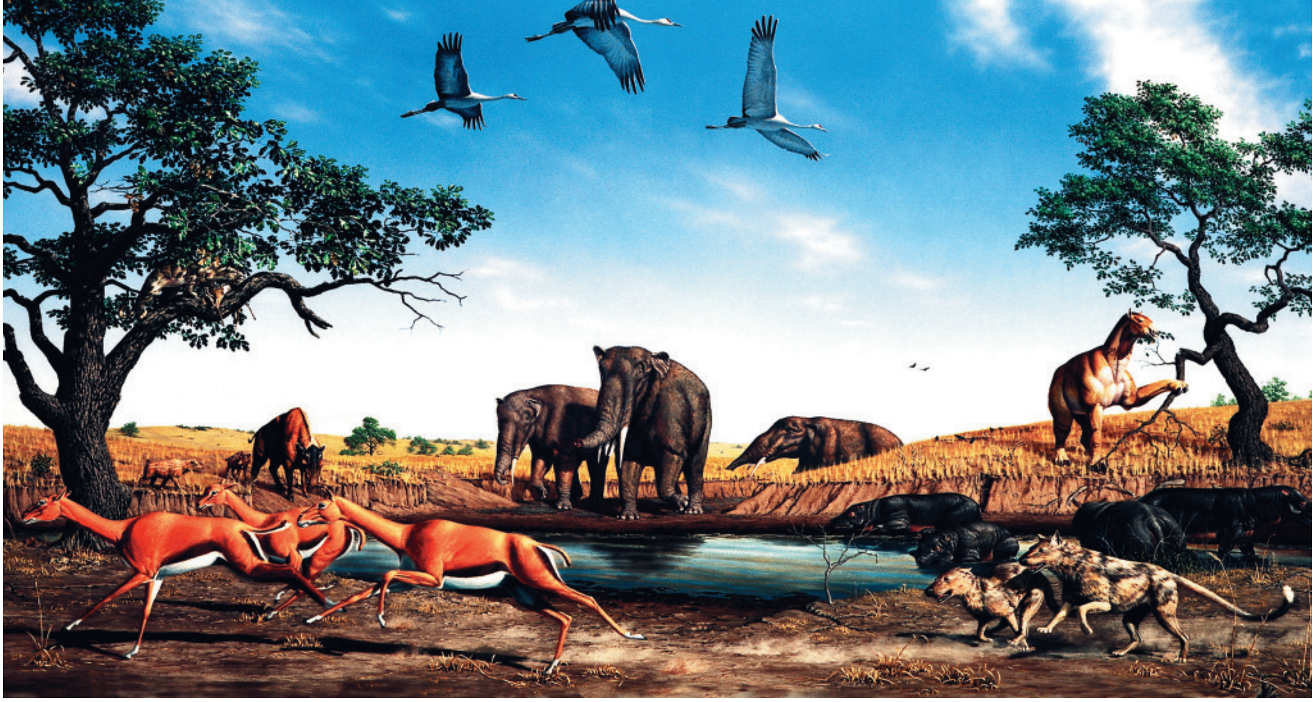

STUDIO – CHASE/GETTY IMAGES

Figura 6.27 Representação artística de cenário do Oligoceno na América do Norte.

Na época seguinte, o Plioceno, o clima mundial tornou-se mais frio e mais seco, com estações do ano bem demarcadas. Foi nessa época que se formou o Istmo do Panamá, unindo a América do Norte e a América do Sul, o que permitiu a migração de fauna entre os dois continentes, no chamado “grande intercâmbio americano de fauna”. Muitas das espécies arcaicas da fauna sul-americana se extinguiram com espécies norte-americanas tomando o lugar de algumas delas. Por exemplo, placentários dotados de dentes de sabre do gênero *Smilodon*, provenientes da América do Norte, substituíram os marsupiais de dentes de sabre.

Marsupiais mais especializados, que exploravam nichos diferentes dos placentários invasores, sobreviveram e deram origem à atual fauna de marsupiais sul-americanos, como gambás e cuícas. Uma linhagem marsupial retornou à América do Norte e originou a única espécie atual do grupo naquele continente, *Didelphis virginiana*. (Fig. 6.28)

O clima do Pleistoceno foi marcado por repetidos ciclos glaciais, com geleiras expandindo-se a partir dos polos e chegando a cobrir 30% da superfície do planeta. A fauna de mamíferos já era essencialmente semelhante à moderna, porém com animais bem maiores do que seus parentes atuais. Nesse período, teria ocorrido a extinção dos homens de Neandertal, que habitavam a Europa. (Fig. 6.29)

Tendo em vista o impacto da espécie humana sobre o curso da vida em escala planetária, os cientistas propuseram a inclusão de uma nova época na escala geológica, dentro do período Quaternário: Antropoceno (do grego *anthropos*, humano, e *kainós*, novo). Até 2015, essa proposta ainda não tinha sido referendada pela Comissão Internacional de Estratigrafia. Um aspecto polêmico é sobre sua cronologia. Alguns sugerem que o começo da nova época seja estabelecido por volta de 8 mil anos atrás, quando tiveram início as atividades agrícolas e o estabelecimento de comunidades humanas sedentárias. Outros propõem que seu início seja a Revolução Industrial (século XVIII), cujos desdobramentos são responsáveis por muitas das mudanças ambientais dos últimos dois séculos.

No entanto, o mais importante é reconhecer que as atividades humanas têm influenciado o curso da vida na Terra e que são necessárias medidas urgentes para minimizar os efeitos negativos futuros, como o risco de uma nova onda de extinções em massa.

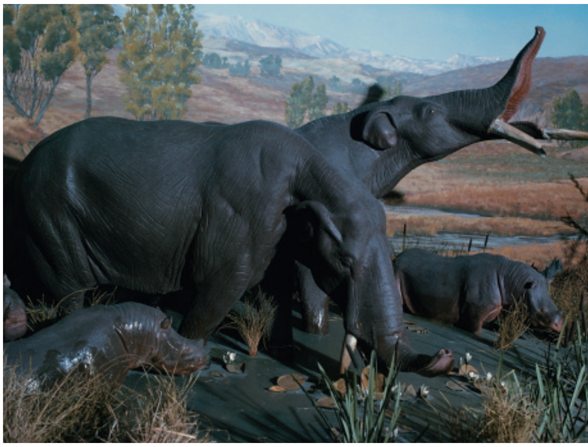

TOM MCHUGH/SCIENCE SOURCE/LATINSTOCK

Figura 6.28 Representação artística de cenário do Plioceno na América do Norte, com destaque para alguns animais típicos dessa época.

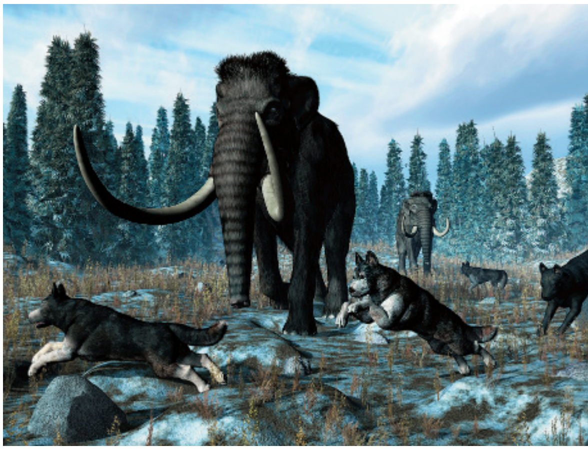

WALTER MYERS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6.29 Representação artística de cenário do Pleistoceno na Europa, evidenciando alguns animais dessa época.

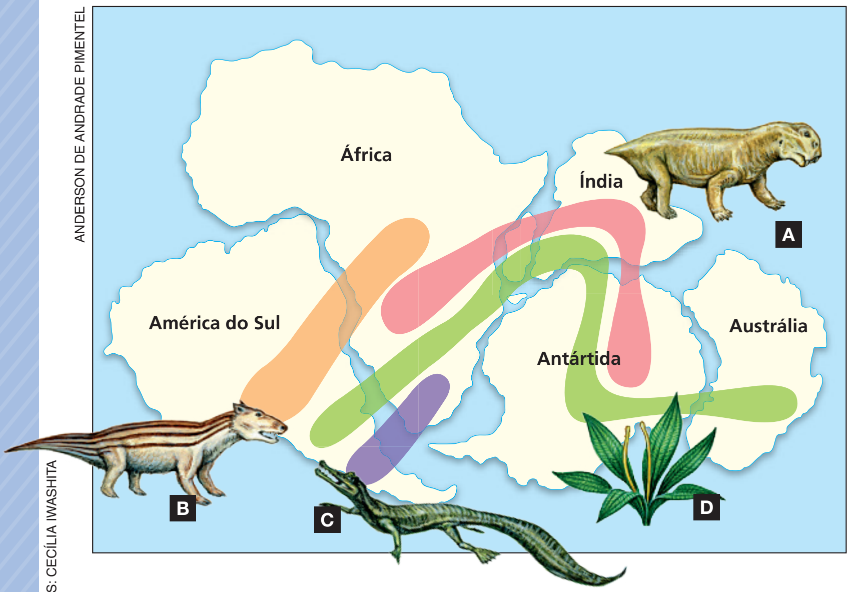
Amplie seus conhecimentos

A movimentação dos continentes da Terra

A forma e a posição dos continentes, que hoje nos parecem tão estáveis, mudaram completamente ao longo da história geológica da Terra. A teoria científica que embasa essa ideia, conhecida como **teoria da deriva continental**, é apoiada por evidências em diversas áreas do conhecimento, como a Geologia, a Geografia, a Paleontologia, a Física, a Química e a Biologia. Essa teoria propõe explicações integradas para a ocorrência de diversos fenômenos naturais, como os terremotos, a distribuição de vulcões, a origem das grandes cadeias de montanhas, a distribuição de fósseis, de rochas e de petróleo, bem como a distribuição geográfica dos diversos grupos de animais e plantas atuais, entre outros.

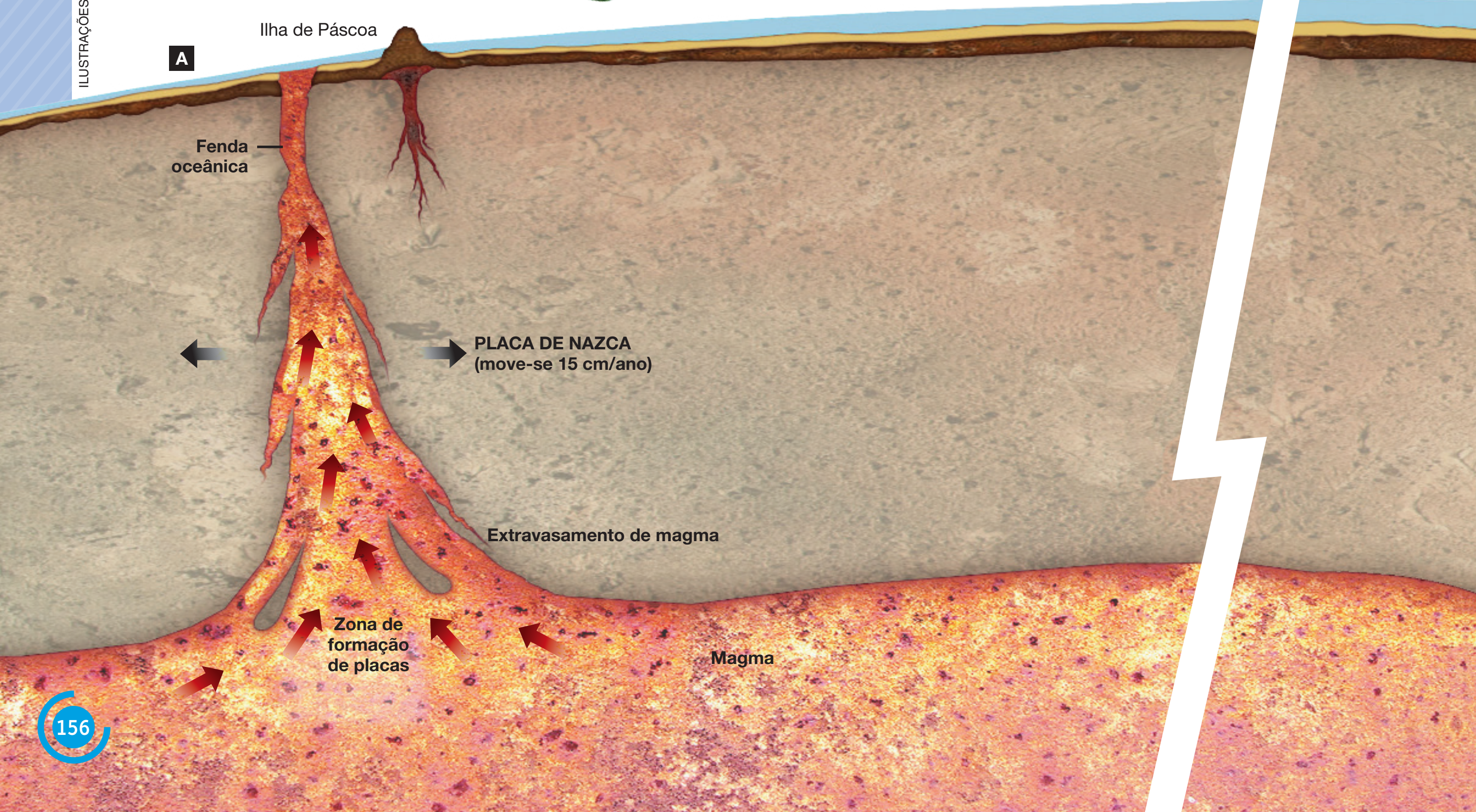
Se você prestar atenção aos contornos das costas leste da América do Sul e oeste da África, notará que elas parecem complementares, como peças de um quebra-cabeça; esse fato foi percebido por

Distribuição de fósseis de algumas espécies



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

A distribuição de fósseis de algumas espécies extintas em diferentes continentes (faixas coloridas) pode ser explicada admitindo que elas viveram em uma época em que esses continentes estavam unidos da maneira proposta pela teoria da deriva continental de Wegener. **A.** Réptil terrestre *Lystrosaurus*, do período Triássico, que media cerca de 1 m de comprimento. **B.** *Cynognathus*, réptil terrestre do Triássico que media aproximadamente 3 m de comprimento. **C.** *Mesosaurus*, réptil de água doce de mais ou menos 1 m de comprimento. **D.** Gimnosperma *Glossopteris*, que atingia cerca de 5 m de altura. A descoberta de fósseis desses organismos em vários continentes é um indício de que essas porções de terra estavam unidas no passado. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)



ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

antigos geógrafos, ao elaborar mapas mais precisos dos continentes. Entretanto, foi apenas em 1912 que o geofísico e meteorologista alemão Alfred Wegener (1880-1930) propôs a primeira explicação racional para essa complementaridade, que constituiu a base da atual teoria da deriva continental. Um de seus argumentos era a distribuição de certos fósseis em diferentes continentes, fato que só podia ser explicado racionalmente admitindo-se que essas espécies viveram em uma época em que os continentes estavam unidos.

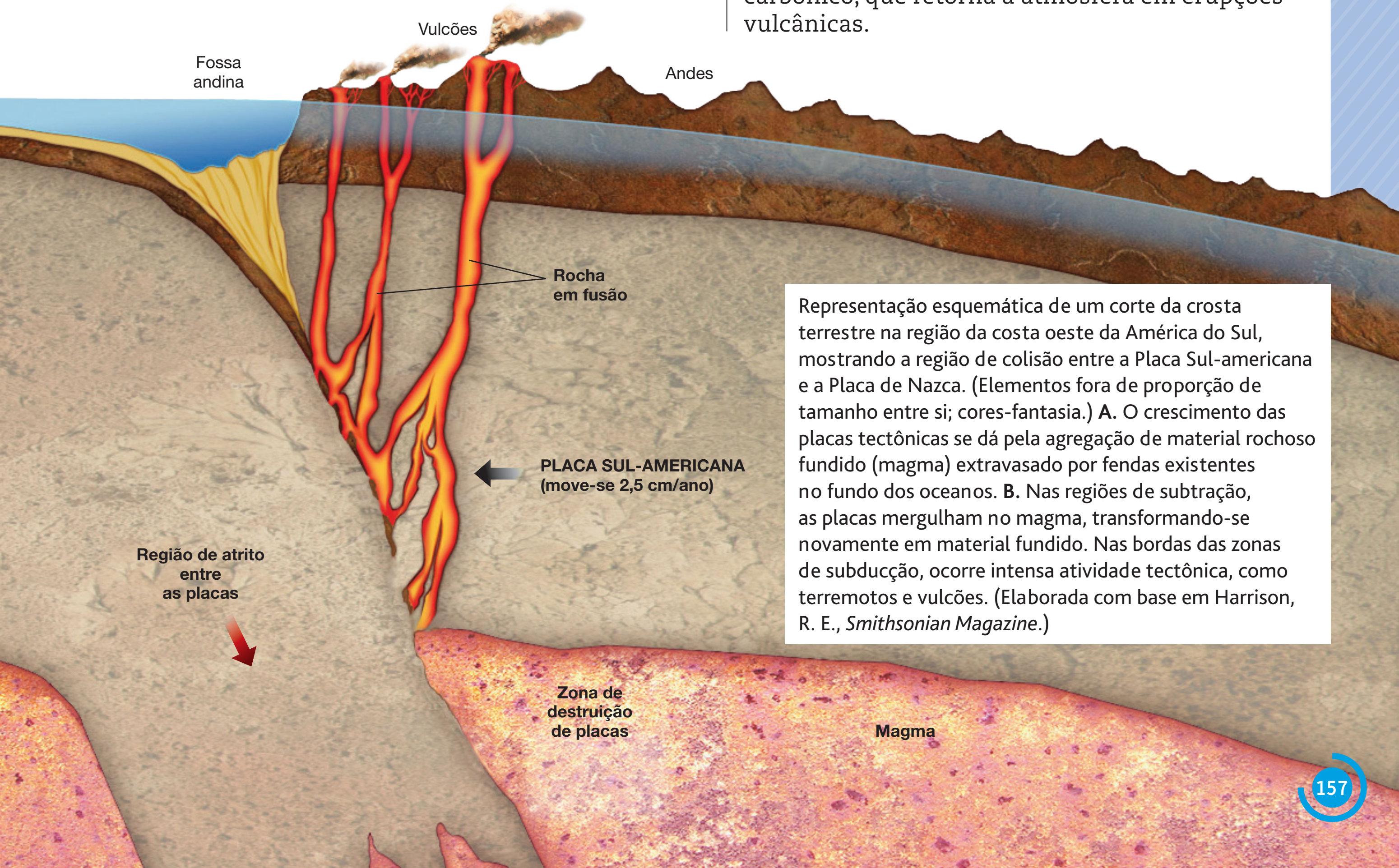
De forma resumida, para Wegener, em um passado distante, toda a terra firme do planeta constituía um único bloco, que se fragmentou e deu origem aos continentes; estes então se separaram e atingiram as posições que ocupam atualmente.

A proposta de Wegener sofreu forte oposição por parte da comunidade científica, na primeira metade do século XX. A Associação Americana de Geologistas do Petróleo chegou a organizar um simpósio especialmente para criticar a teoria da deriva continental, e o paleontólogo estadunidense George Simpson (1902-1984) publicou, em 1943, um violento ataque às ideias de Wegener.

No começo da década de 1950, um novo campo de pesquisa na área das Ciências da Natureza – o paleomagnetismo – forneceu fortes evidências de que a posição dos continentes havia mudado. O campo magnético de rochas da Índia, por exemplo, indicava claramente que ela anteriormente se localizava no Hemisfério Sul, como predito por Wegener.

No começo da década de 1960, a teoria da deriva continental se consolidou, com a descoberta de que há grande atividade geológica no fundo dos oceanos, com formação e destruição de placas rochosas, sobre as quais se assentam os continentes. Essas placas, denominadas **placas tectônicas** ou placas litosféricas, crescem em certas bordas, por agregação de material proveniente do magma que extravasa por fendas do fundo dos oceanos; com isso, os continentes se deslocam. No meio do Oceano Atlântico, por exemplo, há uma fenda por onde sai magma e que causa o afastamento das placas sobre as quais se assentam a América do Sul e a África. Com isso, esses continentes se afastam à velocidade de 2 cm por ano. Em bordas opostas às que crescem, as placas mergulham umas sob as outras (zonas de subducção), fundindo-se ao magma.

Os cientistas admitem que a movimentação das placas tectônicas tem desempenhado papel importante para a manutenção da vida na Terra, participando ativamente do ciclo do carbono. Parte do gás carbônico (CO_2) atmosférico dissolve-se nos lagos e oceanos, formando, com o cálcio, o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), substância sólida que se deposita no fundo submerso. Quando as placas se fundem e se misturam ao magma, o carbonato de cálcio se decompõe, liberando gás carbônico, que retorna à atmosfera em erupções vulcânicas.


Vulcões
Fossa andina
Andes
Rocha em fusão
PLACA SUL-AMERICANA (move-se 2,5 cm/ano)
Região de atrito entre as placas
Zona de destruição de placas
Magma

Representação esquemática de um corte da crosta terrestre na região da costa oeste da América do Sul, mostrando a região de colisão entre a Placa Sul-americana e a Placa de Nazca. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) **A.** O crescimento das placas tectônicas se dá pela agregação de material rochoso fundido (magma) extravasado por fendas existentes no fundo dos oceanos. **B.** Nas regiões de subtração, as placas mergulham no magma, transformando-se novamente em material fundido. Nas bordas das zonas de subducção, ocorre intensa atividade tectônica, como terremotos e vulcões. (Elaborada com base em Harrison, R. E., *Smithsonian Magazine*.)

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. Considere as informações a seguir sobre algumas ocorrências referentes ao processo de especiação. Qual é a alternativa que as ordena na sequência de formação de duas novas espécies a partir de uma população ancestral? 1. d

I. Populações que se cruzam livremente.
II. Acúmulo de diferenças genéticas entre as populações.
III. Estabelecimento de isolamento reprodutivo entre as populações.
IV. Aparecimento de barreira geográfica entre as populações.

a) I → II → III → IV
b) I → II → IV → III
c) I → III → II → IV
d) I → IV → II → III

2. “O início da era (▬) é marcado por uma ‘explosão’ de aparecimento de fósseis, o que indica o surgimento de muitas novas linhagens de seres vivos.” Qual das alternativas substitui corretamente a tarja na frase anterior? 2. c

a) Cenozoica.
b) Mesozoica.
c) Paleozoica.
d) Pré-cambriana.

3. Considerando evidências científicas, há quanto tempo, aproximadamente, a vida na Terra teria surgido? 3. d

a) Há 10 mil anos.
b) Entre 4,5 e 5 milhões de anos atrás.
c) Há 6 milhões de anos.
d) Entre 3,5 e 4 bilhões de anos atrás.

4. Qual dos seguintes fenômenos pode ser mais diretamente correlacionado ao aparecimento dos seres fotossintetizantes? 4. c

a) A “explosão cambriana”.
b) A extinção dos grandes répteis.
c) A formação de uma atmosfera rica em gás oxigênio.
d) As glaciações.

5. Acredita-se que os peixes de nadadeiras lobadas – os sarcopterígios – foram os ancestrais imediatos de quais grupos animais? 5. a

a) Anfíbios.
b) Aves e mamíferos.
c) Peixes ósseos.
d) Répteis.

6. Ovos amnióticos, em que os embriões se desenvolvem protegidos da dessecação por anexos embrionários, representaram uma novidade evolutiva que garantiu a independência de água líquida para a reprodução e a conquista do ambiente de terra firme pelos animais. Em que grupo animal essa novidade teria surgido e se estabelecido? 6. e

a) Anfíbios.
b) Aves.
c) Mamíferos.
d) Peixes.
e) Répteis.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

7. Os evolucionistas consideram improvável que a espécie humana venha a se diversificar em novas espécies no futuro. Tendo em mente o conceito biológico de espécie e os processos de especiação, qual é o principal argumento a favor dessa ideia?

8. Duas populações oriundas da fragmentação de uma mesma população original ficaram isoladas geograficamente por um longo período de tempo. Descreva as diferentes alternativas do que pode acontecer, em relação ao isolamento reprodutivo, se essas populações voltarem a se juntar pelo desaparecimento da barreira geográfica entre elas. Inclua, em sua explicação, o conceito de subespécie.

9. Duas espécies de mosca do gênero *Drosophila* – *D. pseudobscura* e *D. persimilis* – apresentam um complexo ritual de corte, em que os machos estendem uma das asas vibrando-a para produzir um som característico da sua espécie. Uma fêmea somente cruzará com machos que produzam os sinais corretos, típicos da espécie. Entretanto, nas condições pouco naturais e superpovoadas das caixas de laboratório onde são cultivadas essas moscas, surgem híbridos entre as duas espécies, principalmente se as moscas forem mantidas à temperatura de 16 °C.

a) Considerando as explicações anteriores, responda: o que justifica classificar *D. pseudobscura* e *D. persimilis* como espécies diferentes?
b) Que tipo de isolamento reprodutivo ocorre entre essas duas espécies de drosófila?

10. O tigre é um animal de hábitos solitários, adaptado ao ambiente de floresta; o leão tem hábitos gregários e vive em regiões de campos abertos. Quando colocados juntos, em recintos de parques zoológicos, fêmeas de tigre podem eventualmente cruzar com machos de leão, ou machos de tigre podem cruzar com fêmeas de leão, produzindo descendência, em alguns casos, fértil.

a) Com base no que foi dito acima, você acha correto classificar tigres e leões como espécies diferentes?
b) Que tipo de isolamento reprodutivo ocorre entre esses animais na natureza?

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

11. Atividade prática: Construindo um painel dos mapas do mundo no tempo geológico

Você deve ter notado que diferentes figuras do texto sobre eventos relacionados com a história da vida trazem um mapa da configuração dos continentes na referida época. Para facilitar a visualização das transformações pelas quais passou a Terra devido à movimentação das placas litosféricas, sua tarefa é localizar esses mapas-múndi e, com base neles, elaborar um painel que mostre as mudanças na distribuição dos continentes ao longo do tempo geológico. Sugerimos que essa atividade seja feita em grupo de três ou quatro colegas.

Uma sugestão é que os mapas sejam desenhados ou obtidos de arquivos eletrônicos e impressos.

12. Criando um infográfico: Especiação no Lago Vitória

Seu desafio, nesta atividade, é produzir um infográfico para ilustrar o texto jornalístico a seguir. Utilize os recursos que julgar mais adequados, como mapas da região do Lago Vitória, fotografias do local e das espécies mencionadas, desenhos etc. Forme um grupo para executar a atividade. Façam a versão final de seu infográfico em tamanho grande para expor em um mural. Leiam a íntegra da matéria a seguir.

Cientistas observam o surgimento de uma nova espécie

Nós temos uma enorme dificuldade de imaginar fenômenos que ocorreram ao longo de milhões de anos. É uma das razões que levam muitos a não acreditar na evolução. Afinal, você já viu uma nova espécie surgir?

Por isso os biólogos ficam excitados quando conseguem flagrar uma nova espécie. É isso que foi observado recentemente no Lago Vitória, na África, por um grupo de cientistas de mais de dez países.

Nesse lago vivem mais de 500 espécies de peixes da família dos ciclídeos, muitas delas conhecidas de quem possui um aquário em casa. Perto da beira, onde a água é rasa e a luz é abundante, os cientistas descobriram que os peixes têm pigmentos azuis nos seus olhos, mais adequados a um ambiente com muita luz. À medida que a água fica mais profunda e menos luz chega ao ambiente, predominam peixes com pigmentos mais sensíveis à luz vermelha, que funcionam melhor na penumbra. Em algumas bordas do lago, onde a profundidade muda lentamente, os dois tipos de peixe coexistem. O interessante é que esses mesmos peixes podem ter duas cores de pele, alguns são azulados, e outros, avermelhados. Nas regiões de baixa declividade não há correlação entre o tipo de pigmento presente nos olhos e na pele, e as quatro combinações possíveis podem ser encontradas (olho azul/pele azul; olho azul/pele vermelha; olho vermelho/pele azul; e olho vermelho/pele vermelha).

Os cientistas coletaram esses quatro tipos de peixe das regiões de baixa declividade e tentaram descobrir como as fêmeas escolhiam os machos com quem cruzariam. O resultado demonstrou que fêmeas com pigmentos azuis nos olhos (tanto faz a cor de sua pele) preferiam machos de pele azul, e as fêmeas com pigmentos vermelhos nos olhos preferiam machos de cor vermelha. Apesar da preferência, como todos os tipos de cruzamento ocorrem ali, as quatro combinações se mantêm na população.

Quando esses experimentos foram repetidos em regiões da borda do lago, onde a profundidade muda rapidamente, os cientistas descobriram que nas partes mais fundas só ocorriam peixes vermelhos, enquanto no raso só existiam peixes azuis. Quando os cientistas repetiram os experimentos com peixes azuis (coletados no raso) e vermelhos (no fundo), descobriram que nessas regiões de alta declividade do lago todos os peixes com pele azul tinham pigmentos azuis nos olhos e só cruzavam com peixes de pele azul. O mesmo ocorria com os vermelhos, que só cruzavam com peixes da mesma cor e só tinham pigmentos vermelhos nos olhos.

Os resultados demonstram que, nas regiões do lago onde a declividade é maior, os dois tipos de peixe (azuis e vermelhos) já são espécies distintas, incapazes de se misturar, enquanto nas regiões de menor declividade o processo de especiação está em andamento, mas ainda não gerou duas espécies distintas.

A conclusão é que o que está ocorrendo bem na frente dos olhos dos cientistas é o surgimento de duas novas espécies de peixes, uma prova a mais de que a evolução de fato ocorre. Num século em que as notícias sobre a extinção de espécies dominam o noticiário, é confortante saber que no Lago Vitória novas espécies estão surgindo neste exato momento.

O Estado de S. Paulo, 16 out. 2008.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFMS) Na sequência mostrada a seguir, estão relacionados determinados eventos referentes ao processo de especiação biológica.

I. População original.
II. Surgimento de barreira geográfica.
III. Populações que já podem ser consideradas raças distintas.
IV. Populações que já podem ser consideradas espécies distintas.
V. Acúmulo de diferenças genéticas entre populações.
VI. Estabelecimento de isolamento reprodutivo.

Determine a sequência correta que ocorreu na formação de duas espécies novas a partir da população ancestral. 1. c

a) I, V, VI, II, III, IV.
b) I, VI, V, II, III, IV.
c) I, II, V, III, VI, IV.
d) I, II, IV, III, VI, V.
e) I, VI, V, IV, II, III.

2. (Unifor-CE) Atualmente, a hipótese filogenética mais aceita sobre a evolução das principais classes de vertebrados está esquematizada em 2. b

a) peixes → anfíbios → répteis → aves → → mamíferos

b) peixes → anfíbios → répteis ↗ aves
↘ mamíferos

c) peixes ↗ anfíbios
↘ répteis ↗ aves
↘ mamíferos

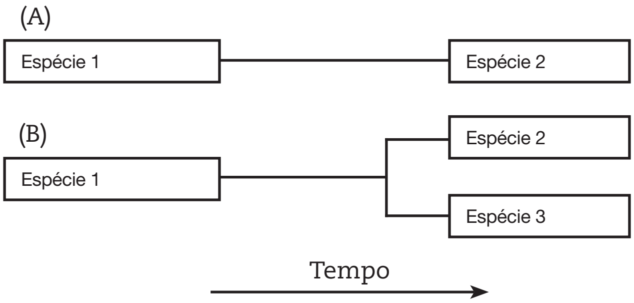
d) peixes → répteis → anfíbios ↗ aves
↘ mamíferos

e) peixes ↗ anfíbios → mamíferos
↘ répteis → aves

3. (Unesp) Três populações de insetos, X, Y e Z, habitantes de uma mesma região e pertencentes a uma mesma espécie, foram isoladas geograficamente. Após vários anos, com o desaparecimento da barreira geográfica, verificou-se que o cruzamento dos indivíduos da população X com os da população Y produzia híbridos estéreis. O cruzamento dos indivíduos da população X com os da população Z produzia descendentes férteis, e o dos indivíduos da população Y com os da população Z não produzia descendentes. A análise desses resultados permite concluir que 3. d

a) X, Y e Z continuaram pertencendo à mesma espécie.
b) X, Y e Z formaram três espécies diferentes.
c) X e Z tornaram-se espécies diferentes e Y continuou a pertencer à mesma espécie.
d) X e Z continuaram a pertencer à mesma espécie e Y tornou-se uma espécie diferente.
e) X e Y continuaram a pertencer à mesma espécie e Z tornou-se uma espécie diferente.

4. (UFRGS-RS) O esquema abaixo refere-se a dois modelos de especiação (A e B).



Considere as afirmações abaixo relacionadas ao esquema.

I. O modelo A representa um exemplo de especiação filética, que pressupõe a ocorrência de isolamento geográfico.
II. O modelo A representa especiação por anagênese, que envolve seleção natural e adaptação a modificações graduais nas condições ambientais.
III. O modelo B representa especiação por cladogênese, que envolve isolamento de populações, adaptação a diferentes ambientes e isolamento reprodutivo.

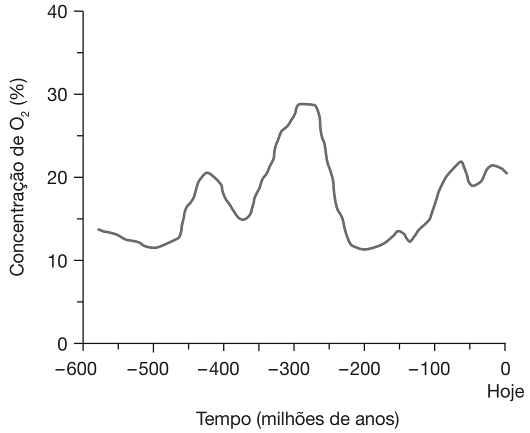
Quais estão corretas? 4. e

a) Apenas I.
b) Apenas II.
c) Apenas III.
d) Apenas I e III.
e) Apenas II e III.

5. (PUC-RS) Alguns radioisótopos são utilizados na Biologia para datar fósseis e rochas antigas com o objetivo de compreender a evolução da vida no planeta. Dois importantes radioisótopos utilizados neste sentido são o carbono-14 e o potássio-40, os quais têm uma meia-vida, respectivamente, de 5.700 anos e de 1,3 bilhão de anos. Ao medir-se a proporção de carbono-14 em um exemplar fóssil de um animal, foi possível concluir, com elevado grau de confiança, que este deve ter vivido há cerca de 30 mil anos. Este fóssil poderia ter sido qualquer um dos animais abaixo, exceto 5. e

a) um peixe ósseo marinho.
b) uma ave de pequeno porte.
c) um mamífero roedor.
d) um invertebrado aquático.
e) um dinossauro de grande porte.

6. (Enem-MEC) Pesquisas recentes estimam o seguinte perfil da concentração de oxigênio (O_2) atmosférico ao longo da história evolutiva da Terra:



ADILSON SECCO

No período Carbonífero, entre aproximadamente 350 e 300 milhões de anos, houve uma ampla ocorrência de animais gigantes, como insetos voadores de 45 centímetros e anfíbios de até 2 metros de comprimento. No entanto, grande parte da vida na Terra foi extinta há cerca de 250 milhões de anos, durante o período Permiano. Sabendo-se que o O_2 é um gás extremamente importante para os processos de obtenção de energia em sistemas biológicos, conclui-se que 6. c

a) a concentração de nitrogênio atmosférico se manteve constante nos últimos 400 milhões de anos, possibilitando o surgimento de animais gigantes.

b) a produção de energia dos organismos fotossintéticos causou a extinção em massa no período Permiano por aumentar a concentração de oxigênio atmosférico.

c) o surgimento de animais gigantes pode ser explicado pelo aumento de concentração de oxigênio atmosférico, o que possibilitou uma maior absorção de oxigênio por esses animais.

d) o aumento da concentração de gás carbônico (CO_2) atmosférico no período Carbonífero causou mutações que permitiram o aparecimento de animais gigantes.

e) a redução da concentração de oxigênio atmosférico no período Permiano permitiu um aumento da biodiversidade terrestre por meio da indução de processos de obtenção de energia.

7. (Enem-MEC) Se a exploração descontrolada e predatória verificada atualmente continuar por mais alguns anos, pode-se antecipar a extinção do mogno. Essa madeira já desapareceu de extensas áreas do Pará, do Mato Grosso, de Rondônia, e há indícios de que a diversidade e o número de indivíduos existentes podem não ser suficientes para garantir a sobrevivência da espécie a longo prazo. A diversidade é um elemento fundamental na sobrevivência de qualquer ser vivo. Sem ela, perde-se a capacidade de adaptação ao ambiente, que muda tanto por interferência humana como por causas naturais. Internet: <www.greenpeace.org.br> (com adaptações).

Com relação ao problema descrito no texto, é correto afirmar que 7. b

a) a baixa adaptação do mogno ao ambiente amazônico é causa da extinção dessa madeira.

b) a extração predatória do mogno pode reduzir o número de indivíduos dessa espécie e prejudicar sua diversidade genética.

c) as causas naturais decorrentes das mudanças climáticas globais contribuem mais para a extinção do mogno que a interferência humana.

d) a redução do número de árvores de mogno ocorre na mesma medida em que aumenta a diversidade biológica dessa madeira na região amazônica.

e) o desinteresse do mercado madeireiro internacional pelo mogno contribuiu para a redução da exploração predatória dessa espécie.

Questões discursivas

8. (Vunesp) As populações A, B, C e D vivem em quatro regiões geográficas diferentes. Quando os indivíduos dessas populações foram colocados juntos, cruzaram-se e os resultados obtidos foram os seguintes:

Cruzamento	Descendentes
A × B	Férteis
A × D	Férteis
B × C	Estéreis
B × D	Férteis
C × D	Estéreis

a) O que se pode concluir do fato de os cruzamentos A × B, A × D e B × D terem produzido descendentes férteis? Que fator inicial poderia ter dado origem às populações A, B, C e D?

b) Que nome se dá às espécies diferentes que vivem numa mesma região geográfica? Indique um exemplo de animais vertebrados que, quando cruzados entre si, produzem descendentes estéreis.

9. (Fuvest-SP) Os fatos a seguir estão relacionados ao processo de formação de duas espécies a partir de uma ancestral.

I. Acúmulo de diferenças genéticas entre as populações.
II. Estabelecimento de isolamento reprodutivo.
III. Aparecimento de barreira geográfica.

a) Qual é a sequência em que os fatos anteriores acontecem na formação das duas espécies?

b) Que mecanismos são responsáveis pelas diferenças genéticas entre as populações?

c) Qual é a importância do isolamento reprodutivo no processo de especiação?

10. (UFSCar-SP) Os répteis possivelmente surgiram no final do período Carbonífero, a partir de um grupo de anfíbios, e tiveram grande diversificação na era Mesozoica. Com o surgimento da fecundação interna e do ovo adaptado ao ambiente terrestre, os répteis superaram a dependência da água para a reprodução.

a) Por que a fecundação interna e o ovo adaptado ao ambiente terrestre tornaram a reprodução dos répteis independente da água?

b) Quais adaptações ocorreram nos embriões dos répteis com relação à alimentação e excreção?

Capítulo 7 Evolução humana

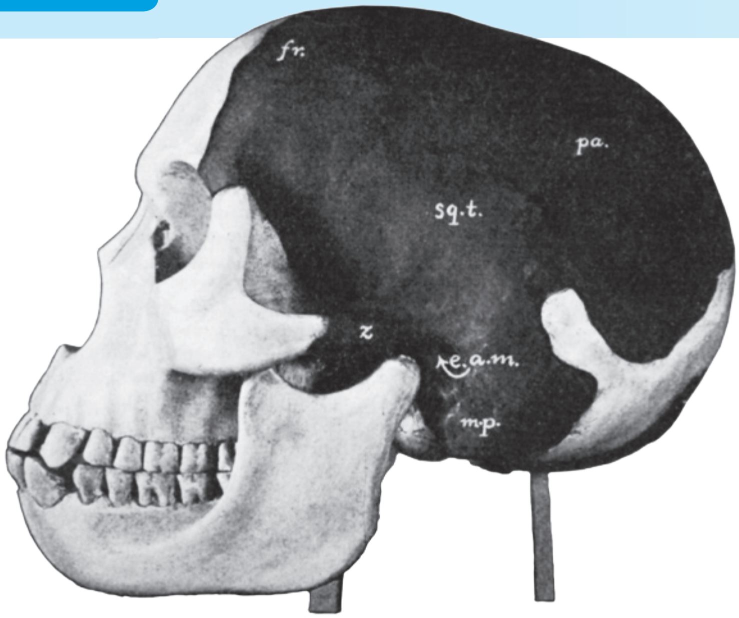


IMAGE ASSET MANAGEMENT/AGB PHOTO LIBRARY/KEYSTONE BRASIL

Crânio do homem de Piltdown, considerado uma das maiores fraudes científicas de todos os tempos.

A fraude e as lições deixadas pelo homem de Piltdown

Em 1912, o arqueólogo amador britânico Charles Dawson (1864-1916) e o paleontólogo britânico do Museu de História Natural de Londres Arthur S. Woodward (1864-1944) anunciaram uma descoberta bombástica: um fóssil que parecia ser o "elo perdido" da evolução humana, reunindo características dos grandes macacos e dos seres humanos. O achado ocorreu na região de Piltdown, em Sussex, na Grã-Bretanha, e, por isso, ficou conhecido como "homem de Piltdown".

Em 1953, o "homem de Piltdown", descrito com o nome científico de *Eoanthropus dawsoni*, passou da condição de elo perdido à maior fraude científica do século XX. Descobriu-se que o fóssil era falsificado: o crânio, tipicamente humano, havia sido tratado com ácidos e sulfato de ferro para parecer antigo. Os dentes foram limados para ter o aspecto de gastos. A mandíbula, cujo encaixe com o crânio tinha sido estrategicamente quebrado, era de um orangotango asiático. Em decorrência dessa fraude, as investigações sérias sobre a ancestralidade humana, como a descoberta do *Australopithecus africanus* em 1924, na África, ficaram temporariamente prejudicadas.

Veja como Reinaldo José Lopes, então editor de Ciências do jornal *Folha de S.Paulo*, referiu-se ao assunto, em 15 de dezembro de 2012:

> Cem anos depois que o público britânico foi engambelado pela apresentação do mais famoso fóssil falso de todos os tempos, um grupo de cientistas quer descobrir, de uma vez por todas, os responsáveis pela fraude.
>
> O fóssil em questão é o "homem de Piltdown", saudado em 1912 como o elo perdido por excelência – embora não passasse, na verdade, de uma mistura mal-ajambrada de ossos de humanos modernos e orangotangos. [...][1]

Entre os cientistas a que se refere o jornalista, está o grupo de pesquisadores do Museu de História Natural britânico liderado pelo antropólogo Chris Stringer (1947-). Entre outras coisas, eles tentam entender por que a falsificação demorou cerca de 40 anos para ser desmascarada; para Stringer, embora não fosse fácil reconhecer a fraude no início do século XX, o fóssil talvez não tenha sido analisado com a devida atenção.

---

[1] Antropólogo investiga "fraude do século". *Folha de S.Paulo*, 15 dez. 2012. Disponível em: <http://folha.com/no1201661>. Acesso em: mar. 2016.

Sem especular sobre os responsáveis pela fraude, podemos perguntar: O que teria levado tal falsificação a ser aceita no meio científico da época? Por um lado, havia certa expectativa pela descoberta de um suposto elo perdido, que viria a confirmar alguns pressupostos da teoria de Darwin. Por outro, os naturalistas europeus pareciam mais inclinados a aceitar a hipótese de que o berço do *Homo sapiens* teria sido a Europa, e não a África.

Em artigo da *Folha de S.Paulo*, Chris Stringer avalia:

> Seja lá quem tenha sido o responsável, a fraude de Piltdown é um lembrete claro de que, na ciência, se algo parece bom demais para ser verdade, é bom desconfiar. A fama do fóssil [falso] atrasou os estudos sobre evolução humana.[2]

A importância do assunto

Além do lembrete de que, em ciência, é importante desconfiar, a fraude de Piltdown traz outras lições importantes: primeira, a ciência é influenciada pelo contexto histórico e está longe de ser infalível; segunda, a visão não dogmática e crítica da ciência permite corrigir visões equivocadas e melhorar a compreensão da natureza.

Neste capítulo, estudaremos a origem e a evolução da espécie humana. A visão científica sobre a ancestralidade humana tem passado por grandes transformações nos últimos anos, tanto em virtude de novas descobertas e de novos métodos de análise, como por mudanças na concepção do próprio processo evolutivo.

A ciência busca explicações mais plausíveis para os diversos fenômenos naturais; um deles, possivelmente o mais intrigante, é a origem de nossa própria espécie. Como isso ocorreu? Há quanto tempo? Quais são as evidências de nosso parentesco com outros animais? Essas são algumas das questões abordadas neste capítulo.

Conhecer um pouco mais sobre a nossa história evolutiva pode nos ajudar a compreender a nossa relação com os demais seres vivos e com a natureza, fazendo-nos refletir sobre a importância da preservação ambiental para a manutenção da espécie humana.

7.1 Nosso parentesco evolutivo com os grandes macacos

Ao voltar para Londres após sua longa viagem ao redor do mundo, Charles Darwin visitou o zoológico para conhecer Jenny, o orangotango, um dos primeiros grandes macacos a ser levado para a Europa. Darwin encantou-se com a inteligência e o humor de Jenny e com a interação amistosa entre o animal e seu tratador. O naturalista ficou impressionado com as semelhanças faciais de Jenny e de um ser humano, observando que a jovialidade do macaco lembrava a de uma criança.

Anos mais tarde, em seu livro *The descent of man and selection in relation to sex* (*A origem do homem e a seleção sexual*), publicado em 1871, Darwin apresentou ideias revolucionárias sobre a origem da espécie humana, destacando nossas semelhanças anatômicas e comportamentais com os grandes macacos. O mesmo já havia sido observado pelo biólogo e anatomista britânico Thomas Henry Huxley (1825-1895).

Darwin e seus seguidores defendiam a ideia de que, num passado relativamente recente, os seres humanos e os grandes macacos tiveram um ancestral comum. Essa ideia não foi bem compreendida na época, gerando a interpretação equivocada de que nossa espécie descende diretamente de macacos atuais, como gorilas e chimpanzés.

É importante reafirmar que nenhuma espécie atual de macaco foi ancestral da espécie humana. Como vimos no capítulo anterior, a teoria da evolução admite que duas novas espécies surgem por cladogênese, ou seja, pela diversificação de uma espécie ancestral. Assim, nenhuma espécie moderna descende de outra espécie também moderna. No entanto, o documentário fóssil revela que nossos ancestrais mais antigos tinham feição mais simiesca que humana; se encontrássemos um deles, nossa tendência seria considerá-lo um macaco e não um ser humano.

---

[2] Disponível em: <www.folha.uol.com.br/fsp/cienciasaude/83789-frase.shtml>. Acesso em: mar. 2016.

Evidências fósseis, genéticas e moleculares recentes têm reafirmado nossas relações de parentesco evolutivo com os grandes macacos. A classificação e a nomenclatura desses grupos expressam essas relações, como podemos ver a seguir. (Fig. 7.1 e Tab. 7.1)

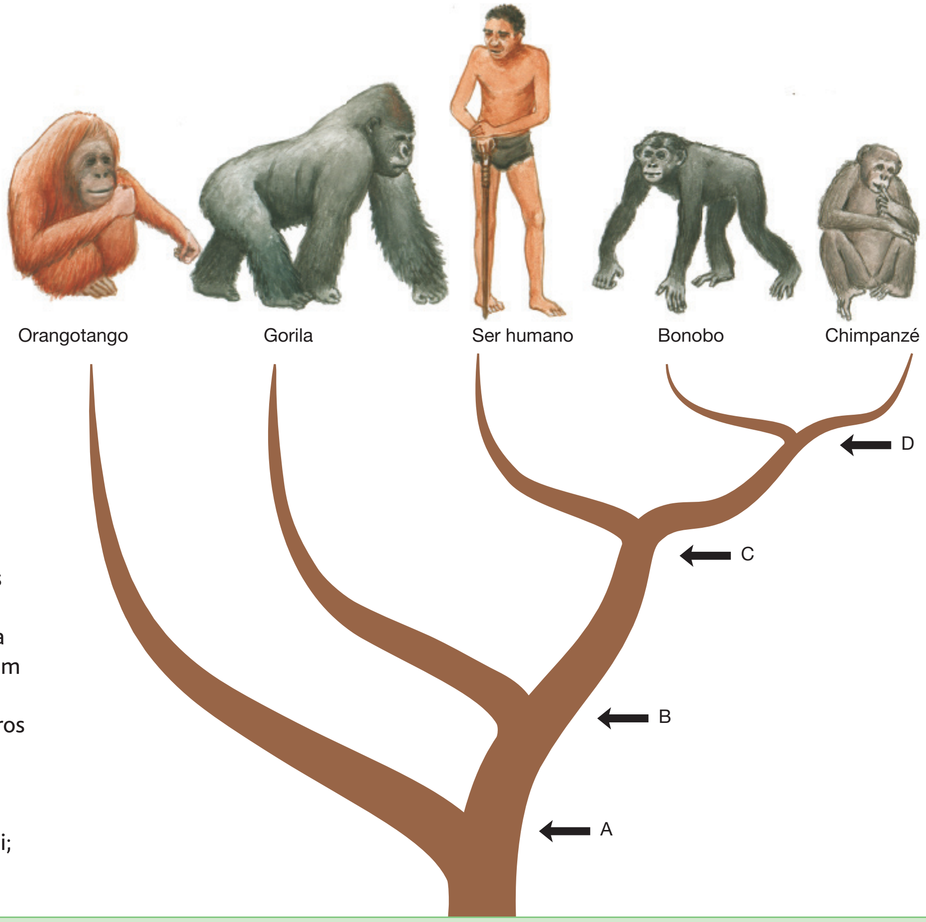


Figura 7.1 Representação da árvore filogenética da espécie humana e das espécies viventes de grandes macacos. **A.** Ancestral comum da família Hominidae. **B.** Ancestral comum da subfamília Homininae. **C.** Ancestral comum dos gêneros *Pan* e *Homo*. **D.** Ancestral comum de chimpanzés e bonobos. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

TABELA 7.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PRIMATAS

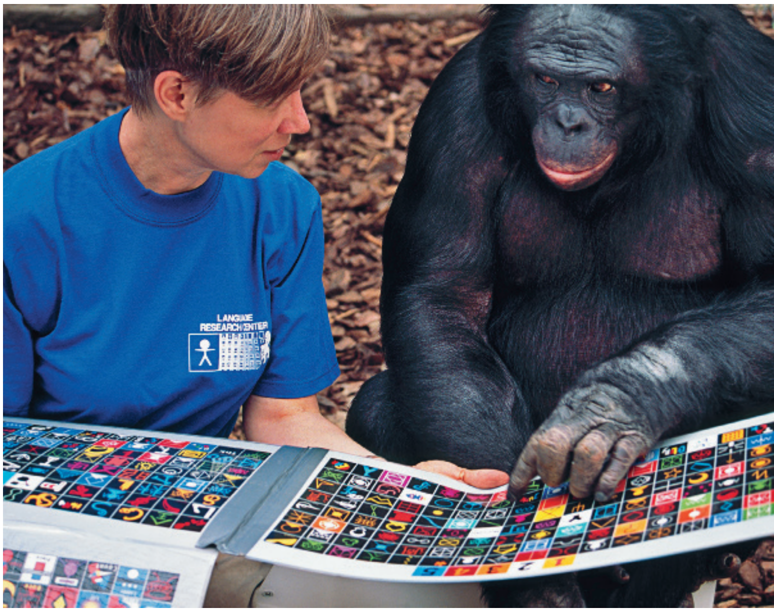
Ordem Primates	Subordem **Prosimii** ou **Strepsirrhini**	Infraordem **Lemuriformes**: lêmures.			
		Infraordem **Lorisiformes**: lóris, gálagos e indris.			
	Subordem **Tarsiiformes**: társios.				
	Subordem **Anthropoidea**	Infraordem **Platyrrhini**: macacos do Novo Mundo (ex.: saguis, macacos-pregos etc.).			
		Infraordem **Catarrhini**			
			Superfamília **Cercopithecoidea**: macacos do Velho Mundo (ex.: babuínos, mandris, colobos etc.).		
			Superfamília **Hominoidea**		
				Famíla **Hylobatidae**: gibão.	
				Famíla **Hominidae**: grandes símios.	
					Subfamília **Ponginae**: orangotangos (gênero *Pongo*).
					Subfamília **Homininae**: gorilas (gênero *Gorilla*), chimpanzés e bonobos (gênero *Pan*) e seres humanos (*Homo sapiens*).

Elaborada com base em Mayr, E., 2002.

Semelhanças e diferenças entre seres humanos e grandes macacos

Comparações anatômicas e fisiológicas

Quando comparamos espécies da família hominídea – *Homo sapiens* (espécie humana), *Pan troglodytes* (chimpanzé), *Pan paniscus* (bonobo), *Gorilla gorilla* e *Gorilla beringei* (gorilas), *Pongo abelii* e *Pongo pygmaeus* (orangotangos) –, constatamos diversas semelhanças anatômicas. As principais diferenças referem-se ao tamanho relativo do encéfalo, à capacidade cognitiva, à distribuição de pelos corporais, à dentição e a mudanças anatômicas decorrentes da adaptação de caminhar sobre duas pernas. (Fig. 7.2)



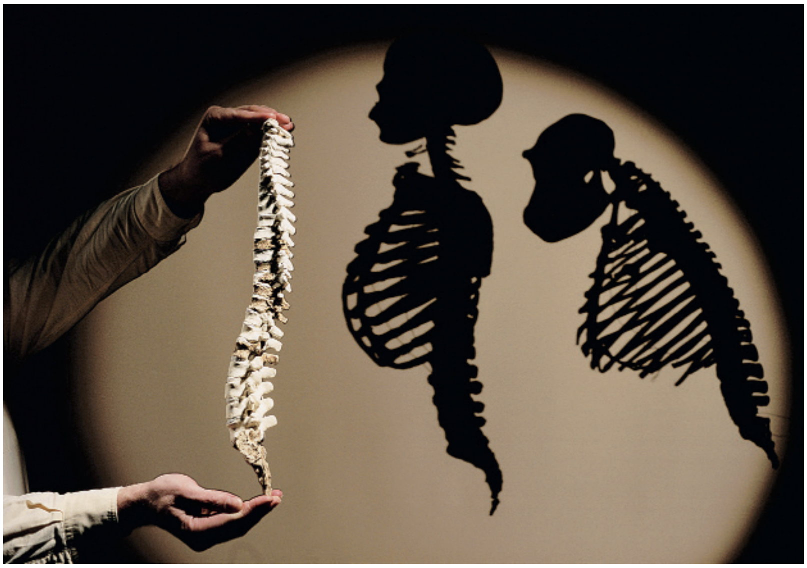
FRANS LATING, MINT IMAGES/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 7.2 Uma primatologista utiliza um sistema de símbolos para se comunicar com um bonobo (*Pan paniscus*), no Centro de Pesquisas da Linguagem da Universidade Estadual da Georgia (EUA, 1998). Os bonobos medem pouco mais de 1 m de altura.

A adaptação tipicamente humana de caminhar de forma ereta sobre as pernas – o **bipedalismo** – levou a diversas mudanças anatômicas no corpo humano em relação aos dos grandes macacos. Eles conseguem agarrar e manipular objetos com os pés, pois têm o primeiro dedo em posição oponível, como ocorre com nossas mãos. Em contrapartida, os pés humanos são proporcionalmente mais longos e curvos que os dos macacos e, por isso, mais eficientes para suportar o corpo na postura ereta. Nossa coluna vertebral também difere acentuadamente da dos macacos; a coluna do chimpanzé, por exemplo, é um arco simples, enquanto a dos seres humanos apresenta quatro curvaturas, decorrentes da postura ereta. (Fig. 7.3)

A pelve humana (“bacia”) é mais curta, mais larga e mais côncava que a dos grandes macacos, adaptações ao modo de caminhar ereto. Nossas pernas, proporcionalmente mais longas, produzem menos movimentos de “sobe e desce” em uma corrida, por exemplo, o que reduz consideravelmente o gasto energético. Por esse motivo, podemos caminhar distâncias maiores com menos dispêndio de energia que um chimpanzé ou um gorila, por exemplo.

Nossa quantidade relativamente pequena de pelos corporais e a abundância de glândulas sudoríparas permitem manter o corpo resfriado durante grandes esforços físicos. É provável que essas características tenham sido selecionadas principalmente devido à competição por alimento entre nossos ancestrais e outros animais caçadores ou comedores de carniça, nas regiões de clima quente onde evoluímos.



KENNETH GARRETT/NATIONAL GEOGRAPHIC/GETTY IMAGES

Aproveite este momento para explorar os desafios envolvidos na reconstituição de um hominídeo tendo por base os restos fósseis. Discuta de que forma os conhecimentos relativos à Anatomia, tanto de fósseis quanto da espécie humana atual, podem contribuir para as reconstituições do esqueleto e representações artísticas.

Figura 7.3 Os estudos de Anatomia Comparada têm revelado inúmeras semelhanças entre a espécie humana e grandes macacos, como o chimpanzé. A fotografia mostra, à esquerda, um modelo da coluna vertebral de um australopiteco, possível ancestral de nossa espécie. As sombras projetadas mostram a coluna vertebral humana (ao centro) e a de um chimpanzé (à direita). Note as curvaturas de cada uma.

As mudanças evolutivas da pelve humana afetaram o nascimento dos bebês. No parto humano, a cabeça e os ombros precisam girar lateralmente para passar pelo estreito canal entre os ossos da pelve. Por isso, as mulheres geralmente necessitam de ajuda no parto, enquanto outros primatas dão à luz sem nenhuma assistência.

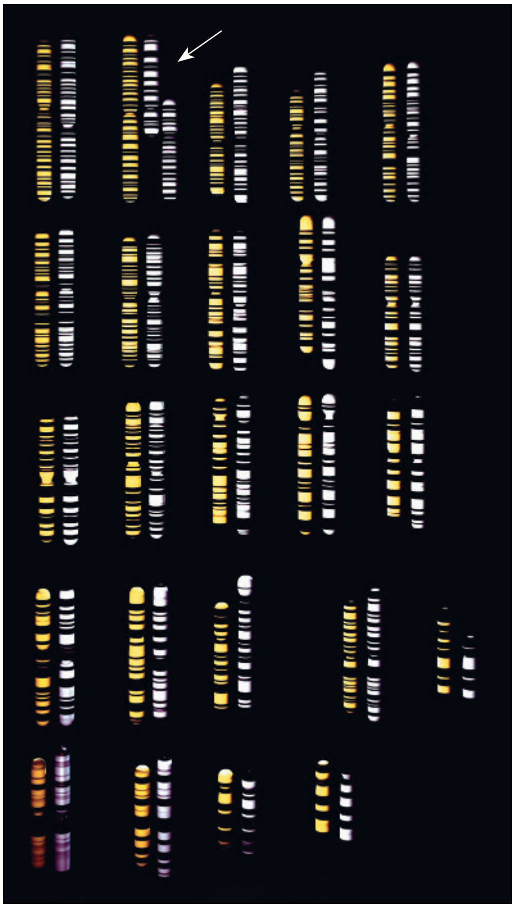
Os recém-nascidos humanos são vulneráveis e necessitam de muitos cuidados por parte dos pais. Por exemplo, chimpanzés recém-nascidos são neurológica e cognitivamente mais desenvolvidos que bebês humanos; entretanto, em menos de seis meses uma criança humana ultrapassa um chimpanzé de mesma idade, pois o desenvolvimento de seu sistema nervoso é mais rápido.

Comparações genéticas

Uma forte evidência do estreito parentesco evolutivo entre a espécie humana e os grandes macacos é nossa semelhança genética. Embora orangotangos, gorilas e chimpanzés possuam 48 cromossomos em suas células somáticas ($2n = 48$) e nós tenhamos 46 cromossomos ($2n = 46$), nossos cariótipos são muito parecidos. Uma diferença marcante refere-se a um dos cromossomos metacêntricos humanos (o cromossomo 2), que corresponde a dois cromossomos acrocêntricos dos grandes macacos. A explicação é que teria havido uma fusão entre esses dois cromossomos na linhagem que originou a espécie humana, após sua divergência da linhagem dos chimpanzés. (Fig. 7.4)

A revista científica britânica *Nature*, de setembro de 2005, apresentou uma comparação genética detalhada entre chimpanzés e seres humanos. Concluiu-se que 96% da sequência de bases nitrogenadas dos genomas das duas espécies é exatamente a mesma; os 4% que diferem nas duas espécies, em sua maioria, referem-se a regiões não codificadoras. Considerando apenas as regiões do DNA que contêm genes, nossa semelhança genética com os chimpanzés chega a 98%. As principais diferenças situam-se em genes relacionados ao controle da fala, da audição, do olfato, das enzimas digestivas e de suscetibilidade a certas doenças.

As diferenças genéticas entre seres humanos e chimpanzés podem ser explicadas pelas diferentes pressões seletivas a que estiveram submetidos nossos ancestrais e os deles, desde sua divergência entre 7 Ma e 8 Ma. Em nossa linhagem, essas pressões se traduziram em adaptações à dieta, ao bipedalismo, à fala e ao raciocínio lógico, entre outras.



JJP/EURELIOS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 7.4 Há grande semelhança entre o cariótipo do chimpanzé (cromossomos brancos à direita, em cada par) e o do ser humano (em amarelo, à esquerda), tanto no que se refere aos tipos de genes quanto à sua distribuição ao longo dos filamentos cromossômicos. Uma diferença marcante refere-se ao cromossomo 2 humano, correspondente a dois cromossomos – 2A e 2B – do chimpanzé (seta). (Microscópio fotônico; aumento ≈ 2300×; cores artificiais.)

Explique aos estudantes que o padrão de bandas observado na imagem permite uma comparação preliminar da correspondência dos cromossomos de seres humanos e chimpanzés. Para confirmar essa correspondência são realizados estudos mais aprofundados de comparação do material genético. Caso haja tempo e interesse, estimule os estudantes a pesquisar sobre o assunto.

7.2 História evolutiva dos primatas

Classificação, origem e diversificação dos primatas

Os seres humanos fazem parte da classe Mammalia (mamíferos), que compreende animais endotérmicos, dotados de pelos corporais e que se alimentam de leite materno quando filhotes. A espécie humana é classificada, juntamente com prossímios, társios e antropoides, no grupo dos **primatas** (**ordem Primates**). A classificação em categorias inferiores à ordem ainda é controversa; aqui, adotamos uma classificação baseada no livro *What evolution is* (*O que é a evolução*), de Ernst Mayr, publicado em 2002 (confira novamente na Tab. 7.1).

Estudos genéticos indicam que a linhagem dos primatas divergiu da dos outros mamíferos por volta de 85 Ma. No entanto, os mais antigos fósseis conhecidos de primatas, classificados no gênero *Plesiadapis*, têm entre 55 milhões e 58 milhões de anos de idade. Eram animais que habitavam florestas da Europa e da América do Norte e, provavelmente, também da África. Na época, ocorria grande diversificação das plantas frutíferas – as angiospermas –, e os primeiros primatas logo se adaptaram à vida nas florestas tropicais em expansão, habitando a copa das árvores e suplementando sua dieta insetívora com frutas e folhas. (Fig. 7.5)

Acredita-se que, no início do Eoceno, entre 50 Ma e 56 Ma, provavelmente em florestas da Europa, surgiram os ancestrais da subordem Prosimii, que deram origem aos lêmures (hoje restritos às ilhas de Madagascar e Comores, na costa oriental da África) e aos lóris, gálagos e indris, que vivem atualmente na África e no sul da Ásia. Também nessa época surgiram os ancestrais da subordem Tarsiiformes, à qual pertencem os társios, que atualmente vivem no sudeste da Ásia. As relações de parentesco evolutivo e a classificação desses primatas ainda são muito controversas. (Fig. 7.6)

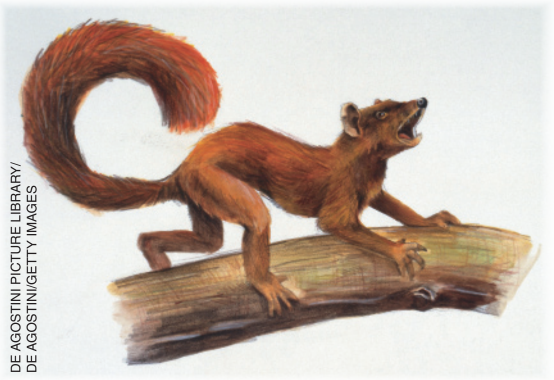
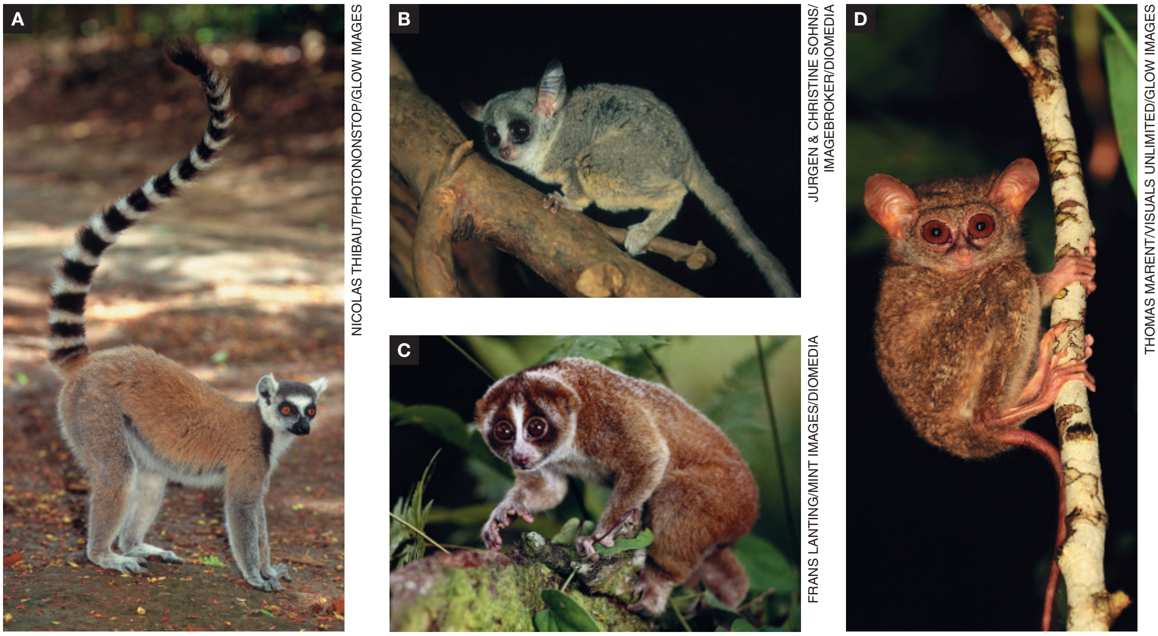

DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY/
DE AGOSTINI/GETTY IMAGES

Figura 7.5 Representação artística de um membro do gênero *Plesiadapis*, o mais antigo primata de que se tem notícia. Esses animais tinham por volta de 60 cm de comprimento e cerca de 2,5 kg de massa corporal, tendo vivido por volta de 60 Ma.

Os **antropoides**, ou **macacos**, como são chamados os representantes da subordem Anthropoidea, surgiram há pelo menos 45 Ma. Acredita-se que as primeiras espécies desse grupo tenham vivido no sul da África, em ambiente arbóreo, alimentando-se principalmente de folhas e frutos. Entre o final do Eoceno e o início do Oligoceno, divergiram duas linhagens de macacos: Platyrrhini e Catarrhini.

Os platirrinos (infraordem Platyrrhini, do grego *platys*, achatado, e *rinós*, nariz, que têm nariz achatado) são macacos que habitam atualmente a América do Sul e a América Central, por isso são chamados macacos do Novo Mundo.

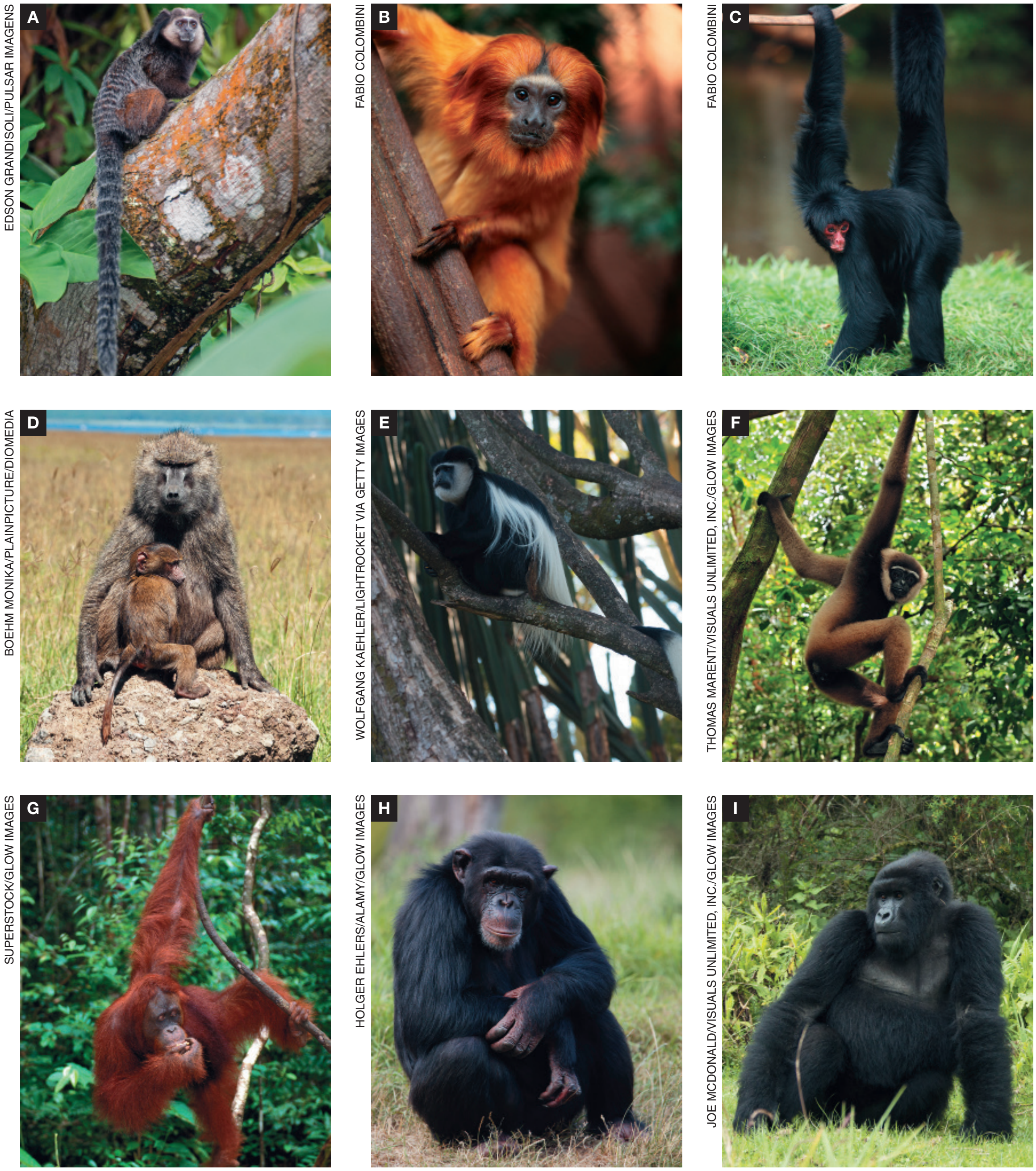
Acredita-se que seus ancestrais tenham atravessado o Oceano Atlântico em jangadas naturais e invadido o continente sul-americano. Nessa época, além da maior proximidade entre a África e a América do Sul, o nível do mar era bem mais baixo que o atual. Algumas cadeias de montanhas, hoje submersas pelo Oceano Atlântico, teriam então ficado expostas como ilhas, facilitando a dispersão dos macacos originários do continente africano.



NICOLAS THIBAUT/PHOTONONSTOP/GLOW IMAGES
JURGEN & CHRISTINE SOHNS/
IMAGEBROKER/DIOMEDIA
FRANS LANTING/MINT IMAGES/DIOMEDIA
THOMAS MARENT/VISUALS UNLIMITED/GLOW IMAGES

Figura 7.6 A. Lêmure da espécie *Lemur catta*, cujo corpo mede cerca de 40 cm de comprimento. **B.** Gálago da espécie *Galago senegalensis*, com aproximadamente 25 cm de comprimento. **C.** Lóri da espécie *Nycticebus coucang*, com cerca de 25 cm de comprimento. **D.** Társio da espécie *Tarsius spectrum*, cujo corpo mede aproximadamente 14 cm de comprimento. Esses animais são primatas, como os macacos e os humanos, mas pertencem a subordens distintas. Na descrição do tamanho dos animais não foi considerado o comprimento da cauda.

Os catarrinos (infraordem Catarrhini, do grego *katá*, para baixo, e *rinós*, nariz, que têm nariz para baixo) compreendem atualmente as superfamílias Cercopithecoidea (babuínos, mandris, colobos etc., também chamados macacos do Velho Mundo) e Hominoidea (os **grandes macacos**). Apesar de alguns fósseis aparentemente catarrinos terem sido descobertos recentemente na Ásia, há pouca dúvida de que o grupo evoluiu e se diversificou no continente africano. (Fig. 7.7)



EDSON GRANDISOLI/PULSAR IMAGENS

FABIO COLOMBINI

FABIO COLOMBINI

BOEHM MONIKA/PLAINPICTURE/DIOMEDIA

WOLFGANG KAEHLER/LIGHTROCKET VIA GETTY IMAGES

THOMAS MARENT/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

SUPERSTOCK/GLOW IMAGES

HOLGER EHLERS/ALAMY/GLOW IMAGES

JOE MCDONALD/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

Figura 7.7 Representantes da subordem Anthropoidea da ordem Primates. De **A** a **C**, macacos platirrinos (infraordem Platyrrhini): **A.** Mico-estrela (*Callithrix penicillata*), que mede cerca de 30 cm de comprimento; **B.** Mico-leão-dourado (*Leontopithecus rosalia*), que atinge aproximadamente 25 cm de comprimento; **C.** Macaco-aranha-de-cara-vermelha (*Ateles paniscus*), que mede cerca de 60 cm de comprimento. De **D** a **I**, macacos catarrinos (infraordem Catarrhini): **D.** Babuínos da espécie *Papio anubis*, cujos adultos medem aproximadamente 70 cm de comprimento; **E.** Colobo da espécie *Colobus guereza*, cujo tamanho varia de 45 cm a 70 cm de comprimento; **F.** Gibão da espécie *Hylobates agilis*, que chega a medir aproximadamente 90 cm de altura; **G.** Orangotango da espécie *Pongo pygmaeus*, cujo tamanho varia entre 1,10 m e 1,40 m de altura; **H.** Chimpanzé (*Pan troglodytes*), que atinge até 1,70 cm de altura; **I.** Gorila-das-montanhas (*Gorilla beringei beringei*), que chega a 1,80 m de altura. Orangotangos, gorilas e chimpanzés pertencem à família Hominidae. (Na descrição do tamanho dos animais das fotografias de **A** a **E**, não foi considerada a cauda.)

A descoberta, em 2009, do fóssil descrito como *Saadanius hijazensis*, datado entre 28 Ma e 29 Ma, sugere a ancestralidade comum entre as linhagens cercopitecida (macacos do Velho Mundo) e hominoida (grandes macacos), indicando que esses dois grupos teriam divergido no Oligoceno.

Durante o Mioceno, a linhagem hominoida teria se diversificado e espalhado pela África e Europa, como atestam diversos fósseis encontrados nesses continentes. No entanto, fósseis indicativos da divergência entre orangotangos, gorilas, chimpanzés e seres humanos são praticamente desconhecidos. Essas linhagens provavelmente divergiram em ambientes de florestas tropicais, onde as condições do solo e do clima não favorecem a fossilização. As datas de divergência desses grupos têm sido estimadas com base na similaridade genética entre as espécies viventes.

Datações genéticas recentes indicam que a linhagem ancestral dos orangotangos surgiu entre 12 Ma e 16 Ma. A linhagem ancestral dos gorilas teria surgido entre 7 Ma e 9 Ma, pouco antes da separação entre as linhagens ancestrais dos chimpanzés e dos seres humanos, calculada entre 7 Ma e 8 Ma. (Fig. 7.8)

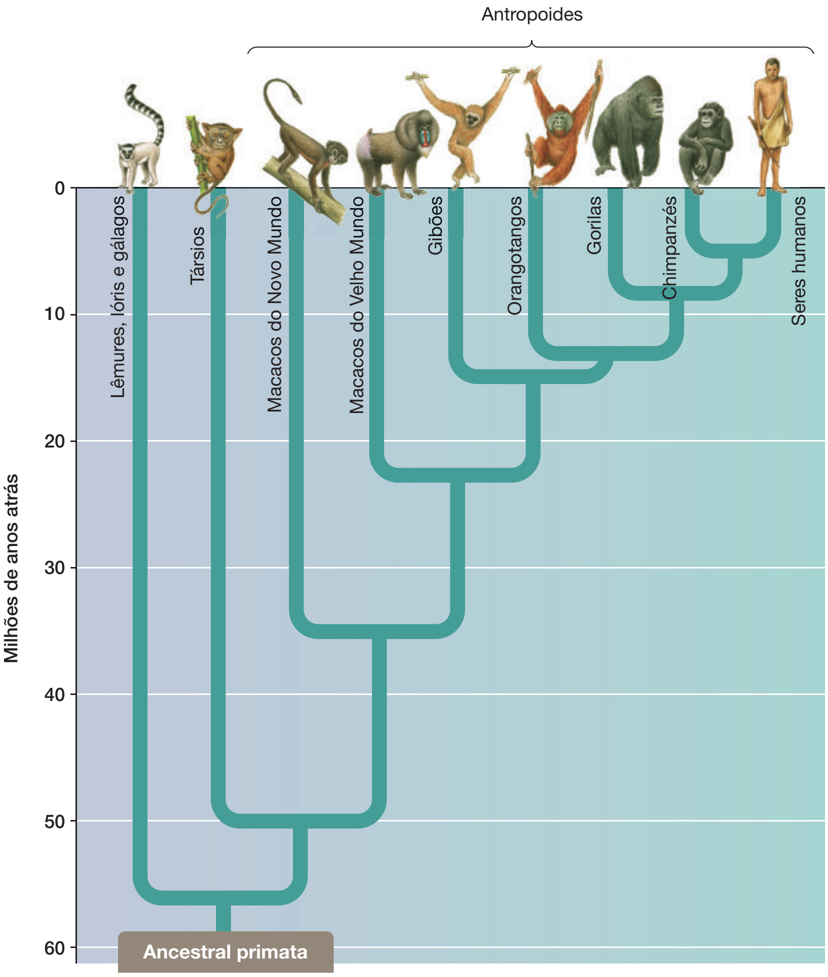


Figura 7.8 Árvore filogenética dos primatas, construída com base em evidências fósseis e genéticas. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Tendências evolutivas entre os primatas

A vida na copa das árvores influenciou fortemente a evolução dos primatas, sobretudo por proporcionar proteção contra os carnívoros predadores que viviam no solo. A vida arborícola, entretanto, permitiu que os primatas se adaptassem a uma dieta essencialmente herbívora, constituída principalmente de folhas, frutos e sementes, e desenvolvessem habilidades de se agarrar eficientemente aos galhos, locomovendo-se com segurança na copa das árvores. Possibilitou também reduzir o número de filhotes para um ou dois por gestação.

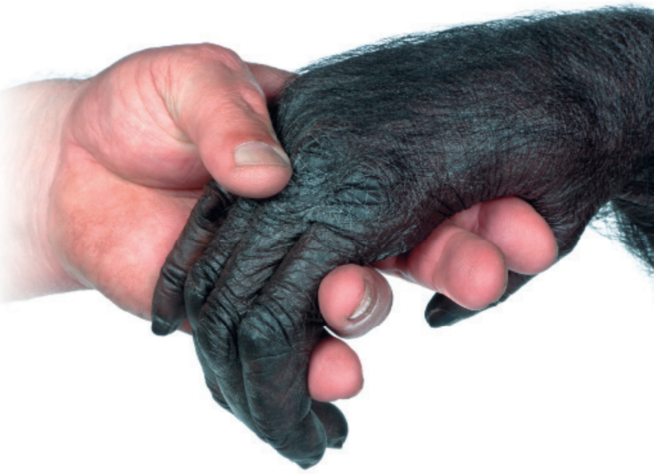
O sucesso adaptativo dos primatas no ambiente arborícola aumentou as chances de sobrevivência, com aumento da duração do ciclo de vida. Com isso, houve mais tempo para cuidar da prole e estabelecer os princípios da vida social, que são características importantes nos antropoides, em geral, e na espécie humana, em particular.

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Primeiro dedo oponível

Os primatas foram bem-sucedidos em sua estratégia evolutiva por apresentarem, entre outros atributos, membros superiores dotados de ampla rotação e liberdade de movimentos e mãos e pés dotados de mobilidade e flexibilidade.

As mãos da maioria dos primatas conseguem agarrar objetos com força e precisão graças ao **polegar oponível**, isto é, localizado em uma posição que lhe permite aproximar-se frontalmente de qualquer outro dedo, atuando como pinça para agarrar. Com essas características, nossos ancestrais puderam saltar de galho em galho e explorar ativamente o ambiente arborícola. (Fig. 7.9)



INGRAM PUBLISHING/DIOMEDIA

Figura 7.9 O polegar das mãos humanas e o dos chimpanzés são oponíveis, isto é, podem se opor a todos os outros dedos, o que permite pegar objetos com força e precisão.

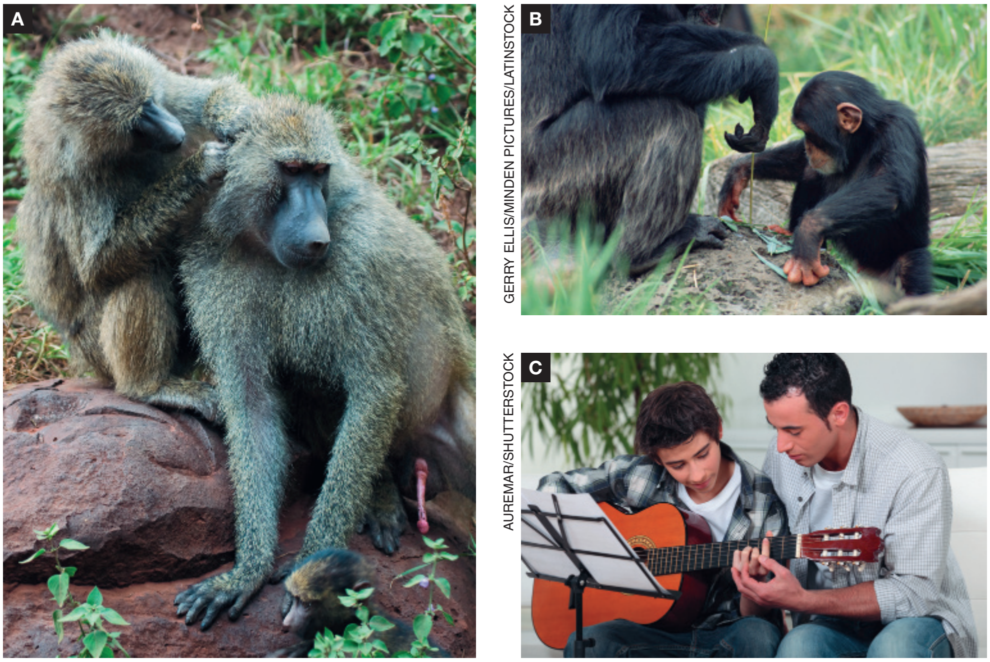
Visão binocular ou estereoscópica

Outra aquisição evolutiva dos primatas, em sua adaptação à vida nas árvores, foi a proximidade entre os olhos, situados na região frontal do crânio, a face. Por estarem nessa posição, os dois olhos miram o mesmo objeto com pequena diferença de ângulo visual, permitindo que o cérebro calcule, por triangulação, a distância em que aquele objeto se encontra. Essa capacidade, denominada **visão binocular**, ou estereoscópica, deve ter sido fundamental para a sobrevivência de nossos ancestrais no ambiente arborícola, onde um salto mal calculado podia ser fatal.

Vida familiar e cuidado com a prole

Os primatas são, entre os mamíferos, os que dedicam mais tempo em cuidar da prole. A maioria dos primatas tem um único filhote por parto e cuida dele por longo tempo. Em relação a todos os outros primatas, a espécie humana é a que alcança a maturidade mais tarde.

Um ser humano leva meses para atingir graus de mobilidade e independência equivalentes aos de um chimpanzé recém-nascido. Assim, os filhos de seres humanos dependem dos pais por um tempo relativamente longo, durante o qual aprendem os valores culturais básicos. Essa característica, aliada a um sistema nervoso bem desenvolvido, foi essencial para a evolução cultural da humanidade. (Fig. 7.10)



SUPERSTOCK/GLOW IMAGES

GERRY ELLIS/MINDEN PICTURES/LATINSTOCK

AUREMAR/SHUTTERSTOCK

Figura 7.10 A vida social desempenha papel importante entre os primatas e é um dos fios condutores de sua evolução. **A.** Babuínos da espécie *Papio anubis* dedicam muitas horas do dia a atividades sociais, como limpar e alisar o pelo de parentes e companheiros. **B.** Chimpanzés (*Pan troglodytes*) transmitem ensinamentos aos filhotes. **C.** Na espécie humana, o longo período de juventude e dependência em relação à família possibilita a transmissão cultural dos valores típicos de cada sociedade.

7.3 A ancestralidade humana

Ao tratar da ancestralidade humana e da origem de nossa espécie, converse com os colegas de História e de Sociologia e mostre a eles como pretende abordar os conteúdos de evolução humana, avaliando as possibilidades de integrar conhecimentos dessas áreas com a Biologia.

Primeiros representantes da linhagem humana

Em seu livro publicado em 1871, Charles Darwin previu que seriam encontrados vestígios de ancestrais humanos no continente africano. Ele se baseou no fato de que gorilas e chimpanzés – nossos parentes mais próximos, segundo sua teoria – só estavam presentes na África, onde deviam ter vivido os ancestrais comuns à espécie humana e a esses animais.

Na época, essas conclusões não foram bem recebidas pelo mundo científico. Além da falta de evidências que comprovassem a hipótese de Darwin, havia certa predisposição da cultura europeia em rejeitar a ideia de que o berço da humanidade teria sido o continente africano. Até a década de 1920, fósseis claramente relacionados à ancestralidade humana tinham sido encontrados apenas na Europa e na Ilha de Java, na Indonésia.

Os australopitecos

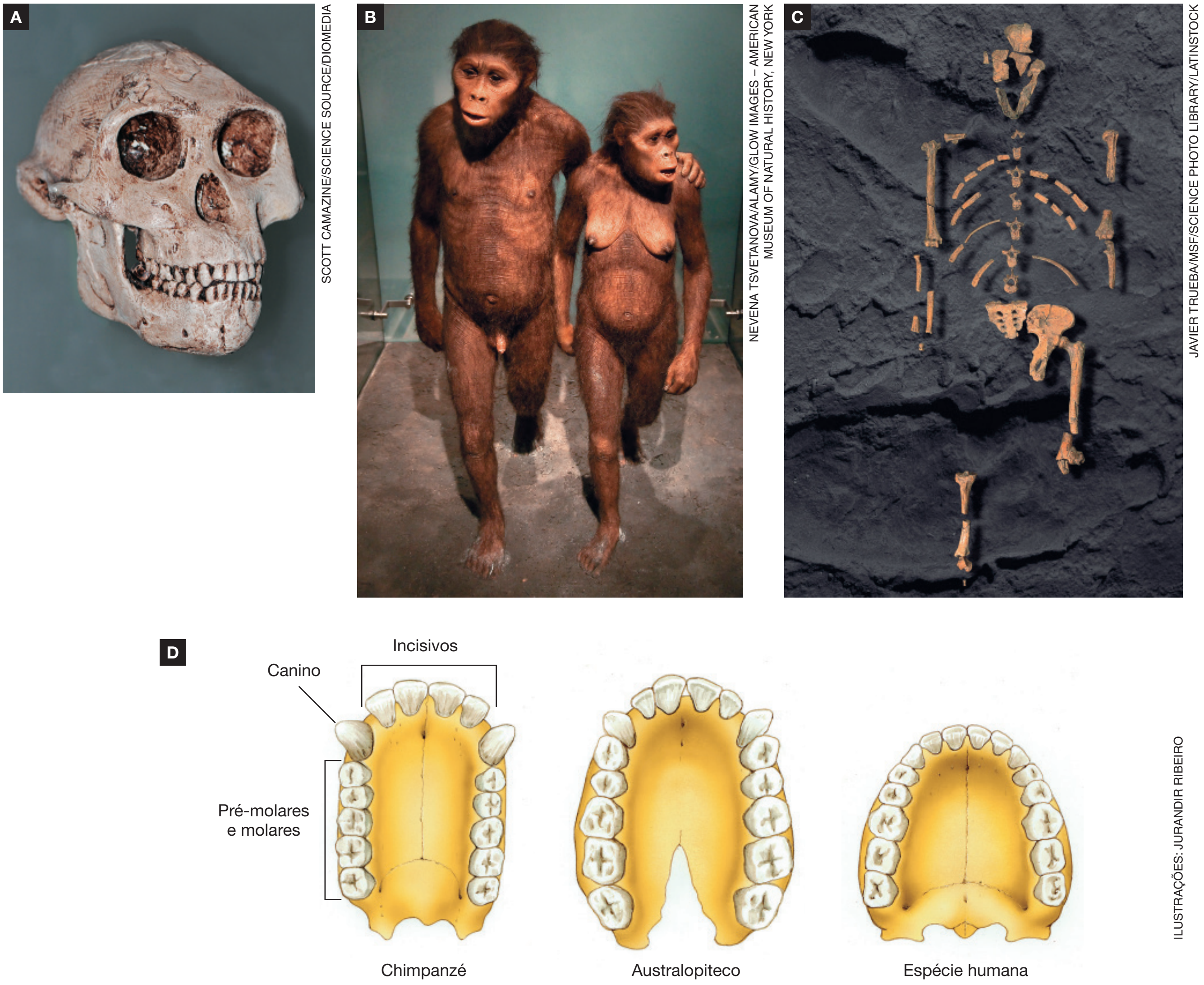
Foi somente em 1924 que um professor de Anatomia, o australiano Raymond Dart (1893-1988), encontrou na África o crânio fóssil de um hominídeo, classificado como *Australopithecus africanus*. A hipótese de Dart, de que podia se tratar de um ancestral da espécie humana, foi desprezada devido à ampla aceitação do então famoso fóssil do homem de Piltdown (relembre na abertura do capítulo).

Com a constatação de que o fóssil de Piltdown era uma fraude, as escavações arqueológicas na África adquiriram novo impulso, levando à descoberta de diversas espécies de australopitecos. Hoje se acredita que o gênero ***Australopithecus***, surgido por volta de 4 Ma, teve grande dispersão no continente africano, com espécies coexistindo em determinados locais e eventualmente competindo entre si. Os australopitecos extinguiram-se por volta de 2 Ma; uma de suas espécies, porém, deve ter sido a ancestral do gênero *Homo*.

A espécie de australopiteco mais conhecida é *A. afarensis*, que viveu entre 2,8 Ma e 3,9 Ma. Em 1978, o paleoantropólogo estadunidense Donald Johanson (1943-) e sua equipe desenterraram centenas de fósseis dessa espécie na Etiópia. Um dos espécimes, cujo esqueleto estava mais completo, teria pertencido a uma fêmea com 1,30 m de altura que viveu por volta de 3,2 Ma. Esse fóssil foi batizado de Lucy, em alusão à canção dos Beatles *Lucy in the sky with diamonds*, que os paleontólogos ouviam em seu acampamento. A tabela a seguir compara algumas características de *A. afarensis* com as de *A. africanus*. (Tab. 7.2 e Fig. 7.11)

TABELA 7.2 COMPARAÇÃO ENTRE DUAS ESPÉCIES DE AUSTRALOPITECO

Características	*A. afarensis*	*A. africanus*
Altura	1 m a 1,5 m	1 m a 1,4 m
Massa corporal	30 kg a 70 kg	30 kg a 60 kg
Características físicas gerais	Corpo leve e membros flexíveis, provavelmente semelhantes aos de um chimpanzé.	Corpo leve e braços provavelmente longos, talvez com postura mais semelhante à humana.
Forma do crânio	Testa curta e oblíqua; face projetada para a frente; prega óssea sobre os olhos (supraorbital) saliente.	Testa mais larga e alta; face mais curta; prega supraorbital menos saliente.
Volume craniano	400 cm^3 a 500 cm^3	400 cm^3 a 500 cm^3
Dentição	Incisivos e caninos relativamente grandes, separados por um espaço; molares de tamanho moderado.	Caninos pequenos, quase do tamanho dos incisivos; sem espaço entre incisivos e caninos; molares maiores.
Dimorfismo sexual	Machos diferem das fêmeas mais marcadamente.	Machos diferem menos marcadamente das fêmeas.
Distribuição temporal	De 3,9 milhões de anos a 2,8 milhões de anos atrás.	De 2,8 milhões a 2,3 milhões de anos atrás.
Distribuição geográfica	Leste da África	Sul da África



SCOTT CAMAZINE/SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

NEVENA TSVETANOVA/ALAMY/GLOW IMAGES – AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY, NEW YORK

JAVIER TRUEBA/MSF/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

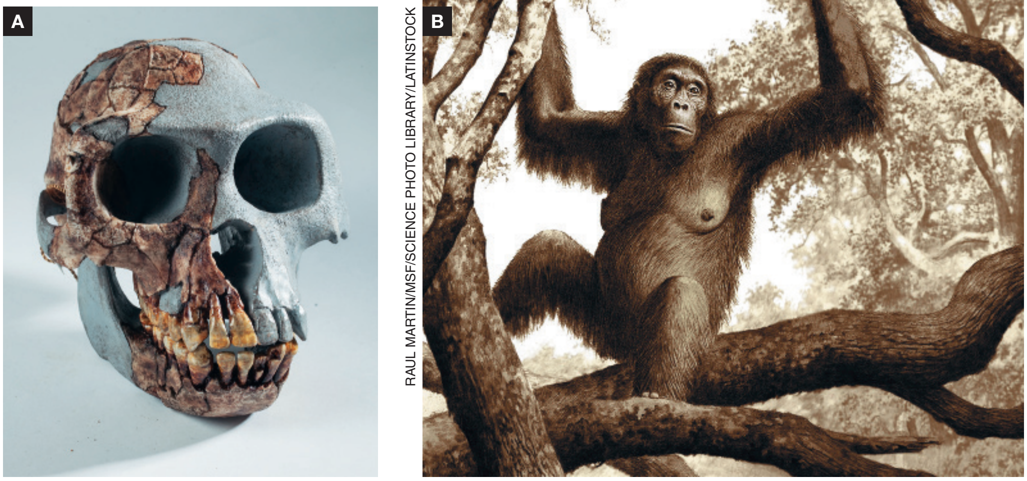
Figura 7.11 **A.** Crânio de hominídeo extinto da espécie *Australopithecus afarensis*. **B.** Representação artística da possível aparência de um casal de *A. afarensis.* **C.** Esqueleto fossilizado de Lucy, cuja idade foi estimada em 3,2 milhões de anos. **D.** Representações esquemáticas comparativas das arcadas dentárias superiores de um chimpanzé, de um australopiteco e de um ser humano. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) (Elaboradas com base em Mader, S. S., 1998.)

Em 1978, na Tanzânia, a equipe liderada pela arqueóloga e antropóloga britânica Mary Leakey (1913-1996) encontrou um conjunto de pegadas fósseis bem preservadas, deixadas por três indivíduos da espécie *A. afarensis* que caminharam sobre cinzas vulcânicas úmidas e fofas, por volta de 3,6 milhões de anos. As pegadas confirmaram o que era sugerido pela forma dos ossos fossilizados da pelve, das pernas e dos pés: *A. afarensis* era bípede e caminhava em posição ereta ou semiereta.

Predecessores dos australopitecos

O documentário fóssil do período inicial da história evolutiva humana, anterior aos australopitecos, era praticamente inexistente até a descoberta, nos desertos do centro e do leste da África, de três espécies que viveram, provavelmente, logo após a divergência das linhagens humana e dos chimpanzés.

Entre 1992 e 1993, foram descobertos em Afar, na Etiópia, fósseis com 4,4 milhões de anos, descritos como *Ardipithecus ramidus*. Esse animal tinha tamanho aproximado ao de um chimpanzé, dentição do tipo humano, crânio pequeno e pernas compatíveis com a postura bípede, apesar de o dedão do pé ser oponível e, portanto, adaptado para agarrar e subir em árvores. (Fig. 7.12)



RICHARD T. NOWITZ/PHOTORESEARCHERS/LATINSTOCK

RAUL MARTIN/MSF/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 7.12 **A.** Modelo do crânio de *Ardipithecus ramidus*, construído com base em ossos fossilizados encontrados em 1994 na Etiópia. As partes de cor marrom correspondem aos ossos fossilizados, e as de cor cinza, ao que foi reconstituído. **B.** Representação artística de uma fêmea de *A. ramidus*.

Em 2000, foram encontrados alguns dentes e ossos da perna e dos dedos de um fóssil de idade estimada em cerca de 6 milhões de anos, descrito com o nome de *Orrorin tugenensis*. Esses achados sugerem que ele era um animal bípede, mas subia em árvores.

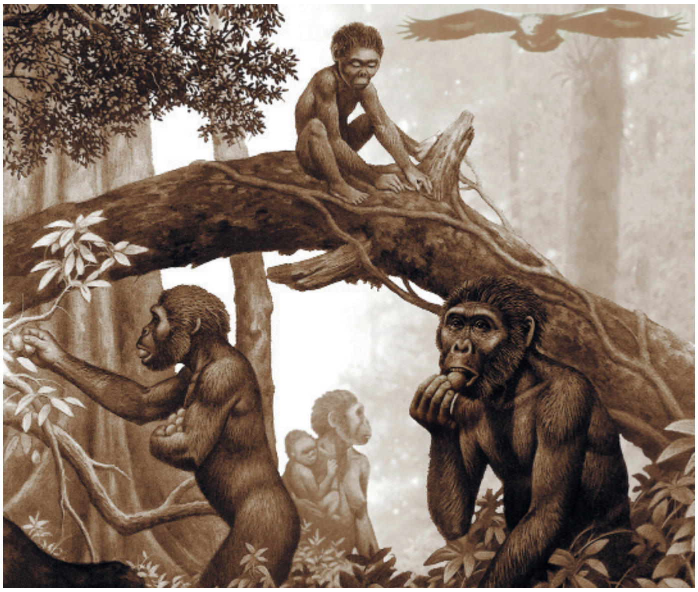
Um crânio fóssil descoberto em 2002, no Chade, pela equipe liderada pelo paleontólogo francês Michel Brunet (1940-) foi descrito como *Sahelanthropus tchadensis*. Segundo seu descobridor, esse primata, que viveu entre 6 Ma e 7 Ma, pode ter sido o ponto evolutivo em que nossa ancestralidade divergiu daquela que originou os chimpanzés. Análises detalhadas do fóssil sugerem que *S. tchadensis* era parecido com um chimpanzé, porém com características mais "humanas", como a face menos projetada para a frente e dentes caninos menores. Supõe-se que, apesar de bem adaptado à vida arborícola, já fazia incursões ao solo.

Tendências adaptativas dos predecessores do gênero *Homo*

Estudos recentes relacionam muitas das características humanas à adaptação de nossos ancestrais aos ambientes arborícolas. Acredita-se que a linhagem que originou os grandes macacos e os seres humanos tenha evoluído nas florestas tropicais africanas, alimentando-se na copa das árvores e raramente descendo ao solo, em um modo de vida semelhante ao dos orangotangos atuais. Ao estágio arborícola sucedeu-se a adaptação da linhagem humana ao ambiente de savana, inicialmente na orla das florestas e, mais tarde, nas savanas abertas.

Evidências geológicas sugerem que, por volta de 8 Ma, ocorreram na África movimentos de placas tectônicas (relembre no capítulo anterior) que elevaram as terras planas e fizeram surgir cadeias de montanhas. Com isso, o clima no leste do continente africano passou por uma drástica modificação, tornando-se mais quente e seco que o do lado oeste. Na região oeste perduraram florestas exuberantes, onde evoluíram os gorilas e os chimpanzés; enquanto isso, a região leste ficou cada vez mais árida, com expansão de amplas áreas de savana, tipo de campo com vegetação arbórea semelhante à encontrada em certas regiões da África atual.

As árvores da savana, menores que as da floresta e mais distantes entre si, devem ter impossibilitado a movimentação de nossos ancestrais pré-humanos na copa vegetal, como faziam na mata tropical. Acredita-se que nesse ambiente de transição entre florestas e savanas arbóreas tenha evoluído o primeiro grupo de primatas considerados antecessores diretos do gênero humano: os australopitecos. (Fig. 7.13)



RAUL MARTIN/MSF/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 7.13 Representação artística de cenário de savana arbórea com um grupo de australopitecos.

Os primeiros australopitecos eram capazes de andar eretos ou semieretos nas áreas abertas das savanas, mas provavelmente ainda dependiam do ambiente arborícola para se proteger e se alimentar.

Chimpanzés e bonobos atuais podem caminhar sobre as duas pernas, mas o fazem sem flexionar os joelhos, dobrando o tronco para manter o equilíbrio. Os seres humanos, por sua vez, andam com o corpo completamente ereto e dobram apenas os joelhos ao caminhar. A análise dos esqueletos de australopitecos sugere que eles não andavam de nenhuma dessas maneiras.

Nas savanas mais abertas, os australopitecos tinham ainda menos abrigo que na savana arbórea. As áreas de vegetação mais rala, com amplas pastagens, possibilitaram a colonização por vários tipos de mamíferos herbívoros (gnus, búfalos, girafas, antílopes etc.) e, consequentemente, por seus predadores (leões, leopardos, hienas, cães selvagens etc.); estes provavelmente incluíam nossos ancestrais em sua dieta.

Um grande desafio dos australopitecos era encontrar alimento na savana, mais árida que as florestas tropicais. Isso levou à seleção de um conjunto de adaptações em sua dentição, que passou a permitir a mastigação de alimentos vegetais duros, como sementes e raízes. Acredita-se que os australopitecos suplementavam sua dieta básica com carniça, obtida de carcaças abandonadas por leões e guepardos antes de chegarem outros carniceiros, como hienas e abutres.

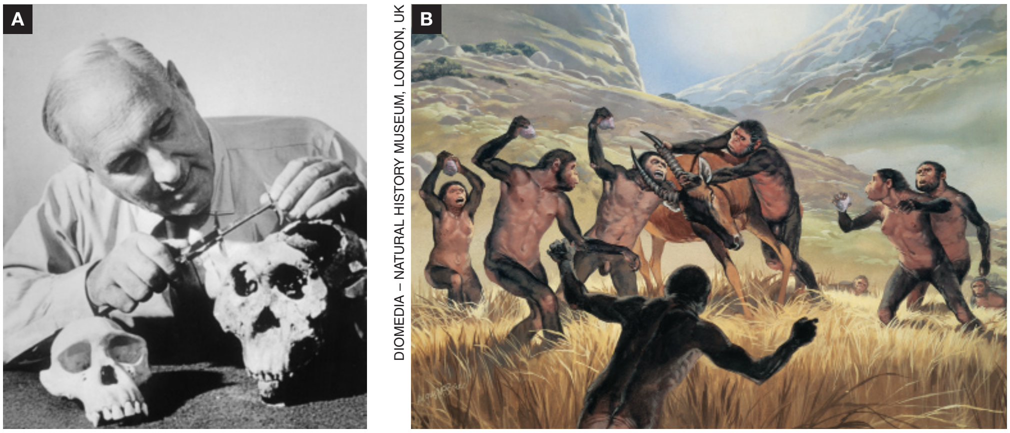
Origem e evolução do gênero *Homo*

A história da evolução humana foi profundamente marcada pelas mudanças ambientais ocorridas na África, entre o final do Plioceno e o começo do Pleistoceno. O clima africano tornou-se progressivamente mais seco – semiárido –, o que coincidiu com o início de um período glacial no Hemisfério Norte. As florestas reduziram-se, e grande parte das savanas arbóreas transformou-se em savanas abertas, constituídas por árvores e arbustos menores, separados por extensas áreas de gramíneas.

Nesse ambiente desafiador, a maioria dos australopitecos se extinguiu, mas em algumas linhagens desenvolveram-se determinadas características favoráveis ao novo ambiente; foram essas linhagens que sobreviveram. Segundo Mayr, algumas populações de australopitecos devem ter aprimorado mecanismos de defesa para sobreviver, atirando pedras ou transformando outros objetos de madeira em armas. Talvez tenham recorrido a porretes, como fazem os atuais chimpanzés do oeste da África, ou a ramos espinhosos para espantar seus predadores, ou ainda improvisado tambores para assustá-los com o barulho. No entanto, sua melhor defesa foi o fogo.

As pressões seletivas que atuaram sobre os australopitecos, nas savanas abertas, levaram ao aparecimento de novas linhagens de hominídeos, capazes de fabricar e utilizar ferramentas rudimentares e de se beneficiar do uso do fogo. O grande sucesso dessas linhagens deveu-se, certamente, ao desenvolvimento do sistema nervoso e da inteligência; começavam assim a surgir espécies primatas tipicamente humanas, atualmente classificadas no gênero ***Homo***.

No início da década de 1960, os paleoantropólogos britânicos Mary Leakey (1913-1996) e seu marido Louis Leakey (1903-1972) encontraram, na Garganta Olduvai, no norte da Tanzânia, fósseis de um hominídeo primitivo com características consideradas intermediárias entre os australopitecos e os *Homo erectus* descobertos anteriormente na Ásia. Na região, Louis Leakey já havia encontrado instrumentos de pedra lascada, cuja confecção foi creditada à espécie fóssil recém-descoberta; por essa capacidade artesanal, a espécie foi denominada *Homo habilis*. (Fig. 7.14)



BETTMANN/CORBIS/LATINSTOCK

DIOMEDIA – NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON, UK

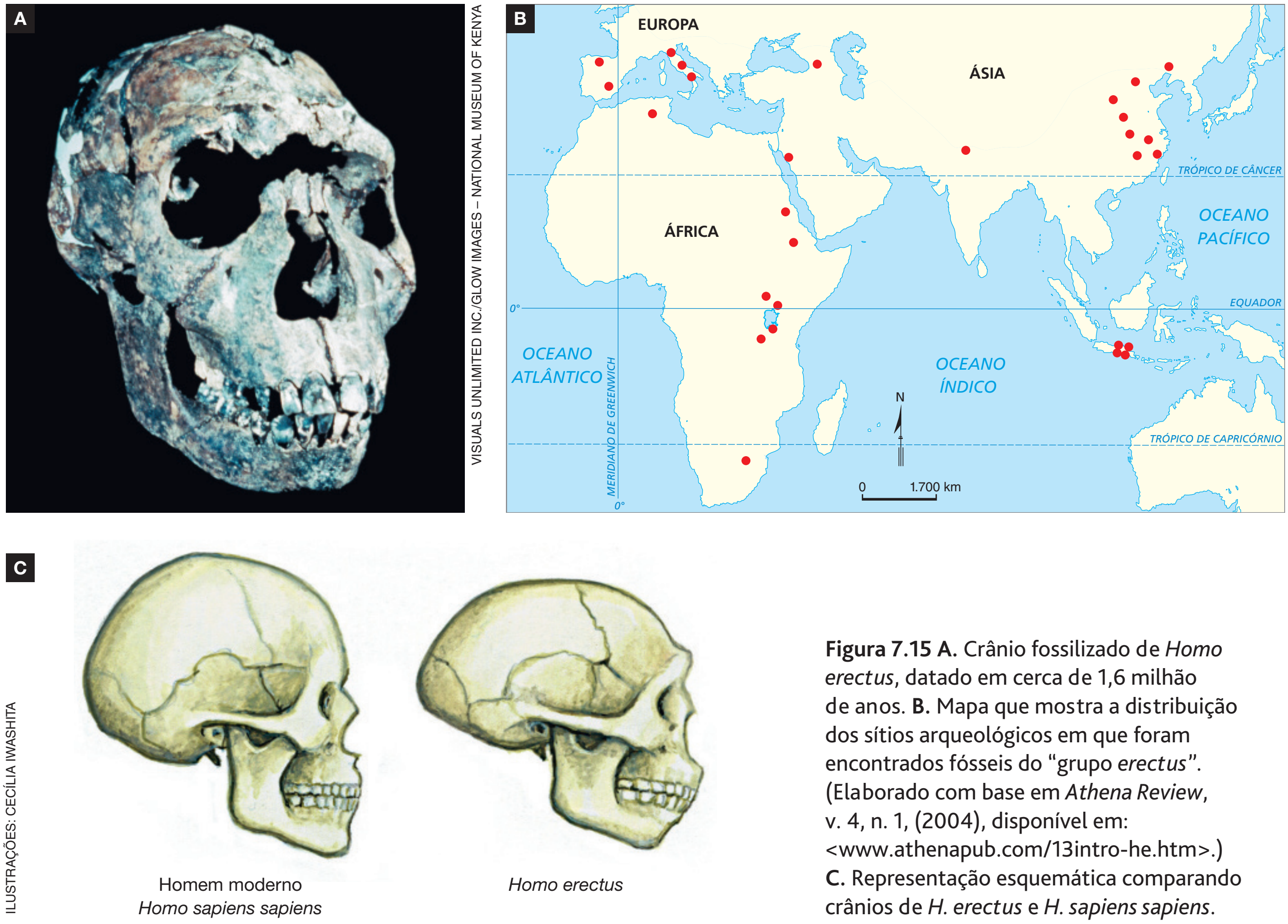
Figura 7.14 A. Louis Leakey examinando crânios fossilizados encontrados em Olduvai, Tanzânia. Por se supor que essa espécie era capaz de fabricar e usar ferramentas, ela recebeu o nome de *Homo habilis*. **B.** Representação artística de um grupo de *H. habilis* em uma caçada.

Apesar de aparentemente mais inteligentes e dotados de organização social mais sofisticada que australopitecos e chimpanzés, a capacidade craniana de *H. habilis* – entre 450 cm^3 e 600 cm^3 – não era significativamente maior que a deles. Além disso, a suposição de que *H. habilis* tenha sido o primeiro hominídeo a fabricar instrumentos tem sido questionada pela descoberta de objetos de pedra lascada associados a fósseis de *Australopithecus garhi*, datados de 2,6 Ma, cerca de 300 mil anos mais antigos que *H. habilis*, que viveu entre 1,4 Ma e 2,3 Ma. Esses e outros fatos têm levado alguns especialistas a considerar *H. habilis* um australopiteco, defendendo sua reclassificação como *Australopithecus habilis*.

Excluindo *H. habilis*, a mais antiga espécie de nosso gênero seria *Homo rudolfensis*, que viveu na África por volta de 2,5 Ma a 1,8 Ma. Esses hominídeos fabricavam ferramentas e tinham volume craniano entre 700 cm^3 e 752 cm^3, significativamente maior que o dos australopitecos. No entanto, alguns estudiosos sugerem que o próprio *H. rudolfensis* seja considerado um australopiteco em virtude da aparência simiesca de seu crânio e por, provavelmente, descender de antigas linhagens de australopitecos. A tendência mais recente, contudo, é incluir os rudolfenses no gênero *Kenyanthropus* (*K. rudolfensis*), que alguns paleoantropólogos, como Meave Leakey (1942-), sugerem ter mais parentesco com a linhagem humana do que *A. habilis*.

Emergência e evolução de *Homo erectus*

Há cerca de 2 Ma surgia um novo grupo de hominídeos, classificado como ***Homo erectus***. Os primeiros fósseis dessa espécie foram encontrados na Ilha de Java, em 1891, e na China, em 1927. Tudo indica que o *H. erectus*, como todos os hominídeos que o antecederam, tenha surgido na África e só depois se expandiu para a Ásia e para a Europa. Por acreditarem que havia várias linhagens ou mesmo espécies diferentes desse grupo de hominídeos, alguns cientistas preferem denominá-los "grupo *erectus*". Os fósseis mais antigos do grupo datam de 1,8 Ma, e os mais recentes, de 300 mil anos atrás. Alguns paleontólogos, no entanto, questionam esta última data e afirmam que fósseis mais recentes encontrados na Ásia, com idade entre 80 mil e 100 mil anos, pertencem à espécie *H. erectus*. (Fig. 7.15)



VISUALS UNLIMITED INC./GLOW IMAGES – NATIONAL MUSEUM OF KENYA

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

Homem moderno
Homo sapiens sapiens

Homo erectus

Figura 7.15 A. Crânio fossilizado de *Homo erectus*, datado em cerca de 1,6 milhão de anos. **B.** Mapa que mostra a distribuição dos sítios arqueológicos em que foram encontrados fósseis do "grupo *erectus*". (Elaborado com base em *Athena Review*, v. 4, n. 1, (2004), disponível em: <www.athenapub.com/13intro-he.htm>.) **C.** Representação esquemática comparando crânios de *H. erectus* e *H. sapiens sapiens*.

Embora variado, o grupo de populações classificadas como *Homo erectus* tinha por representantes hominídeos de postura ereta e maxilares menos proeminentes que seus antecessores australopitecos. Eram mais altos, possivelmente entre 1,50 e 1,60 m, e tinham massa corporal entre 55 e 85 kg. A testa era baixa, com grandes protuberâncias ósseas em torno das órbitas oculares (pregas supraorbitais), características que ainda revelam claramente o parentesco com os símios.

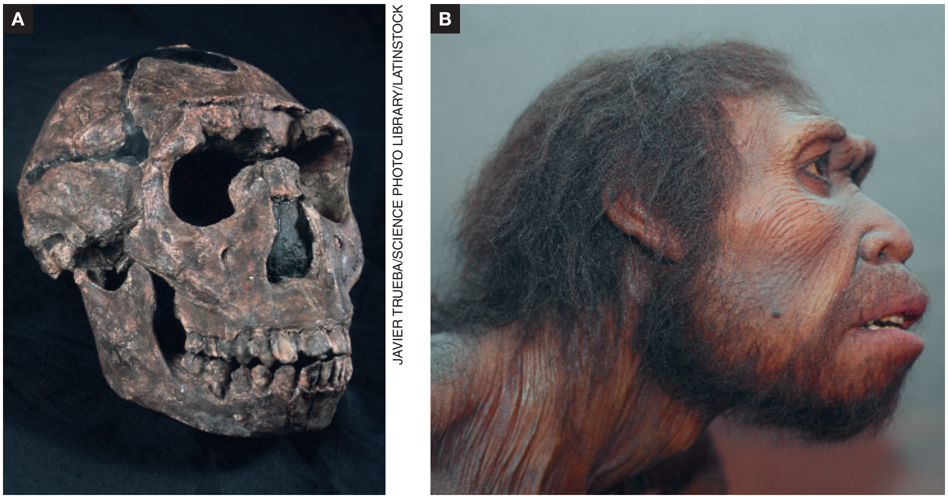
Os fósseis mais antigos de *H. erectus* indicam que seu volume craniano era de aproximadamente 850 cm^3; fósseis mais recentes têm volume craniano superior a 1.100 cm^3, mostrando que, durante o período de existência do grupo *erectus*, houve aumento significativo do tamanho do encéfalo e, provavelmente, da inteligência.

Acredita-se que *H. erectus* tenha sido o primeiro hominídeo a constituir uma sociedade caçadora-coletora semelhante, em termos sociais, à de seres humanos modernos. Para se proteger do frio e dos inimigos, *H. erectus* vestia-se com pele de animais, fazia fogueiras e morava em cavernas. Algumas populações fabricavam ferramentas relativamente avançadas, dotadas de cabos e com diferentes formatos e aplicações variadas. Os *H. erectus* foram provavelmente os primeiros hominídeos a caçar em grupos coordenados, capazes de abater presas de grande porte.

As linhagens do grupo *erectus* que permaneceram na África costumam ser classificadas como *Homo erectus ergaster* ou, simplesmente, *H. ergaster*. Essa dualidade nomenclatural reflete um acirrado debate entre os paleoantropólogos, que ainda não decidiram se *H. erectus* e *H. ergaster* são realmente duas espécies distintas ou se a última é subespécie da primeira. Esse tipo de polêmica é recorrente no estudo da evolução humana, pois não há critérios claros para definir e separar espécies tendo por base o documentário fóssil. A maioria dos fósseis da linhagem humana resume-se apenas a partes de indivíduos, como fragmentos de mandíbula, dentes, pedaços do crânio e dos membros; raramente se encontram fósseis completos. Por isso, reconstituir a estrutura corporal do indivíduo quando vivo exige um estudo exaustivo e rigoroso.

Outra dificuldade dos cientistas é que, mesmo sendo possível reconstituir a aparência de um indivíduo com base em seu fóssil, não se conhece o grau de variação existente naquela espécie, isto é, se o indivíduo fossilizado é representativo ou não de seu grupo. À medida que novos fósseis são encontrados, certas hipóteses são reforçadas e outras têm de ser reformuladas; é assim que o conhecimento científico progride. Com certeza ainda ocorrerão muitas mudanças no quadro da classificação humana que apresentamos neste capítulo.

Voltando à questão do *H. ergaster*, ou *H. erectus* africano, a descoberta de novos fósseis e o aprofundamento dos estudos têm aumentado a aceitação dessa espécie, que teria vivido no leste e no sul da África entre 1,3 Ma e 1,8 Ma. O epíteto específico *ergaster* deriva do grego e significa trabalhador, denotando o fato de esses hominídeos terem fabricado objetos de pedra mais avançados que os produzidos pelas linhagens anteriores. (Fig. 7.16)



JAVIER TRUEBA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

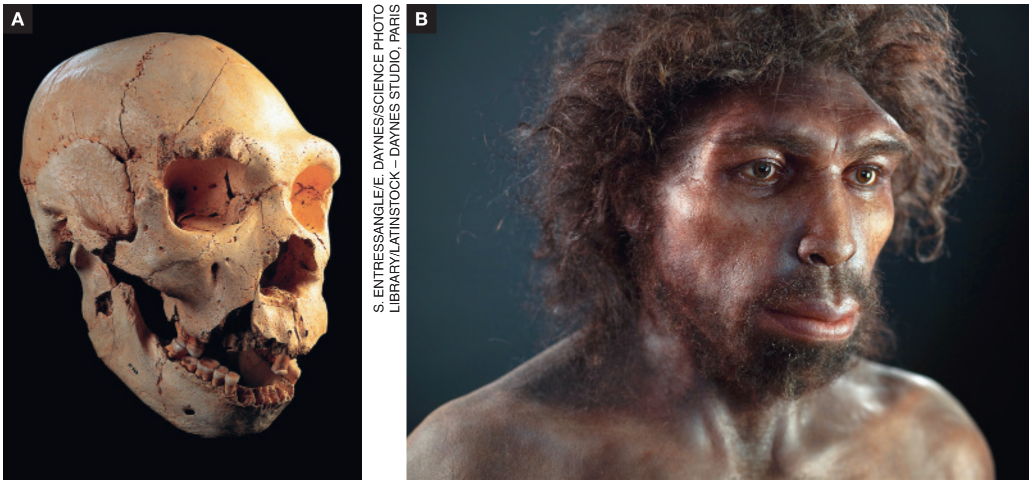
VISUAL&WRITTEN SL/ALAMY/GLOW IMAGES

Figura 7.16 A. Crânio fossilizado de *Homo ergaster*, com idade estimada em aproximadamente 1,5 milhão de anos. **B.** Representação artística da provável aparência facial de *H. ergaster*.

H. ergaster foi possivelmente o ancestral dos hominídeos classificado como ***Homo antecessor***. Fósseis dessa primeira linhagem humana da Europa foram encontrados na Espanha em sítios arqueológicos datados entre 0,8 Ma e 1,2 Ma. Calcula-se que os adultos tinham entre 1,60 m e 1,80 m de altura, com os machos atingindo cerca de 90 kg de massa corporal. O volume encefálico variava entre 1.000 e 1.150 cm^3 em média, menor que a média de 1.350 cm^3 dos seres humanos atuais.

Acredita-se que *H. antecessor* tenha evoluído de uma linhagem de *H. ergaster* que migrou da África para a Europa. Uma hipótese é que essa espécie pode ter se extinguido sem deixar descendentes; outra é que *H. antecessor* e *H. heidelbergensis* constituíam populações de uma única espécie.

Homo heidelbergensis viveu na Europa entre 600 mil e 250 mil anos atrás, e seus fósseis indicam que era um pouco menor que *H. antecessor*, com os machos adultos atingindo em média 1,75 m de altura e 62 kg de massa corporal. Seu volume encefálico, no entanto, era maior, entre 1.100 e 1.400 cm^3 em média, mais próximo ao dos seres humanos atuais. (Fig. 7.17)



JAVIER TRUEBA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

S. ENTRESSANGLE/E. DAYNES/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK – DAYNES STUDIO, PARIS

Figura 7.17 A. Crânio fossilizado de *Homo heidelbergensis* encontrado em Sierra de Atapuerca, Espanha. **B.** Representação artística da provável aparência de um representante do sexo masculino de *H. heidelbergensis*.

Os homens de Neandertal

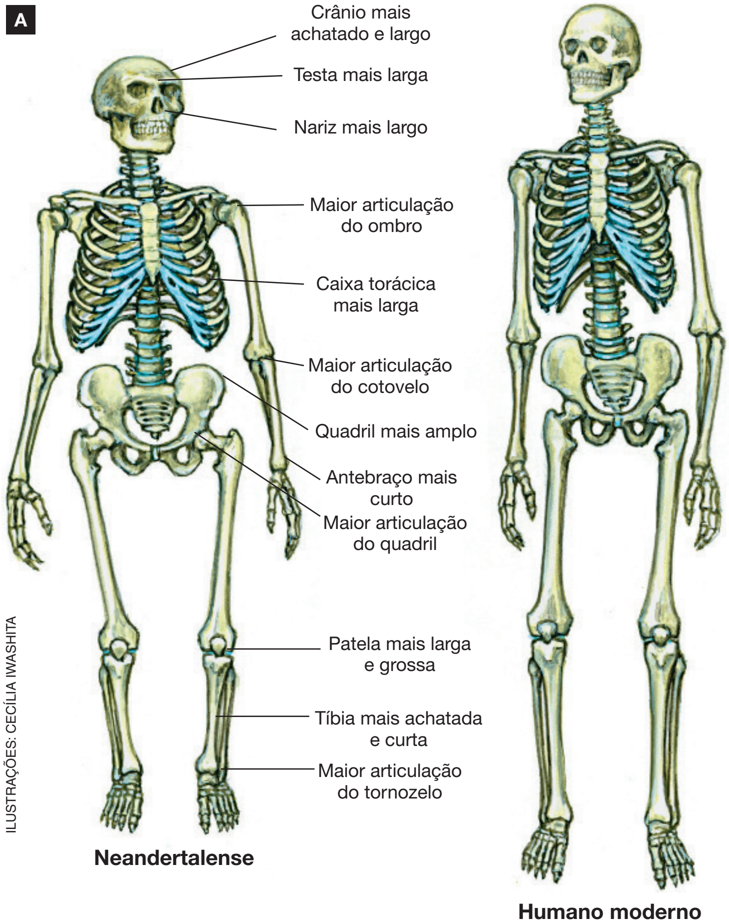
Acredita-se que populações europeias de *H. heidelbergensis* tenham originado, há mais de 300 mil anos, uma linhagem humana cujos fósseis mais conhecidos são os descobertos na Alemanha, no vale de Neander, em 1856. Hoje sabemos que fósseis desses hominídeos já haviam sido descobertos anteriormente, em 1829, em área da atual Bélgica e, em 1848, em Gibraltar.

Na época, o significado desses fósseis não foi bem compreendido pelos cientistas; não havia uma teoria que explicasse sua existência, e eles foram registrados simplesmente como “seres humanos antigos”. Foi apenas após a publicação do livro *A origem das espécies*, de Charles Darwin, que surgiu interesse por aqueles fósseis. Thomas Huxley examinou-os e concluiu que se tratava de uma espécie humana extinta, descrita em 1864 com o nome de ***Homo neanderthalensis***. Darwin menciona esse hominídeo em seu livro de 1871, sobre a origem da espécie humana. Atualmente, alguns especialistas preferem classificar os neandertalenses como uma subespécie (*H. sapiens neanderthalensis*), embora ainda não haja consenso quanto a isso.

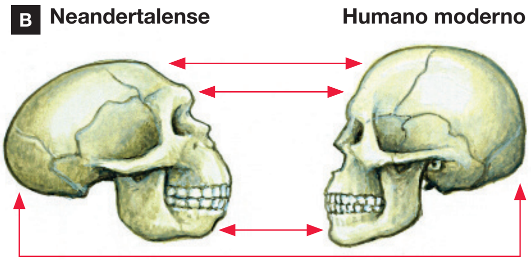
Muitos fósseis descobertos em diferentes regiões da Europa e do Oriente Médio mostram que *H. sapiens neanderthalensis* viveu entre 450 mil e 25 mil anos atrás; nunca foram encontrados fósseis desses hominídeos na África ou na Ásia.

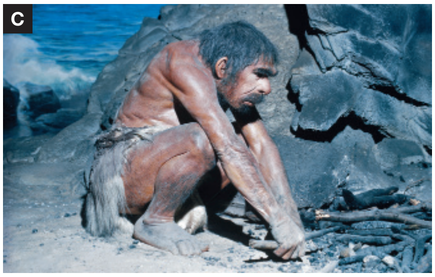
Os neandertalenses tinham corpo atarracado e eram mais fortes que os seres humanos modernos. Os machos tinham entre 1,64 m e 1,68 m de altura e cerca de 70 kg de massa corporal; as fêmeas tinham entre 1,52 m e 1,60 m de altura e pouco menos de 60 kg. Seu volume craniano – que em alguns fósseis atinge 1.600 cm^3 – é maior que o dos seres humanos modernos, mas a testa (parte frontal do crânio) é oblíqua, de modo que a maior parte do volume craniano se concentra na região occipital. O rosto dos neandertalenses tinha feições rústicas, com pregas supraorbitais proeminentes e maxilares salientes. As características físicas, como nariz grande, corpo e membros curtos e compactos, indicam adaptação ao clima frio da Europa na época em que viveram. (Fig. 7.18)

Os neandertalenses usavam elaboradas ferramentas de pedra, o que sugere que deviam ser bons caçadores, capazes de abater presas de grande tamanho. Matéria vegetal cozida encontrada entre os dentes de um crânio fóssil indica que eles incluíam vegetais cozidos na dieta, contradizendo a hipótese de que eram exclusiva ou predominantemente carnívoros. Certos traços anatômicos indicam que os neandertalenses eram capazes de falar, mas a natureza de sua linguagem não é conhecida. Restos encontrados em um sítio arqueológico no leste da Ucrânia mostram que eles podiam construir abrigos sustentados por ossos de grandes mamíferos que viviam na época.


A
Crânio mais achatado e largo
Testa mais larga
Nariz mais largo
Maior articulação do ombro
Caixa torácica mais larga
Maior articulação do cotovelo
Quadril mais amplo
Antebraço mais curto
Maior articulação do quadril
Patela mais larga e grossa
Tíbia mais achatada e curta
Maior articulação do tornozelo
Neandertalense
Humano moderno

ILUSTRAÇÕES: CECÍLIA IWASHITA

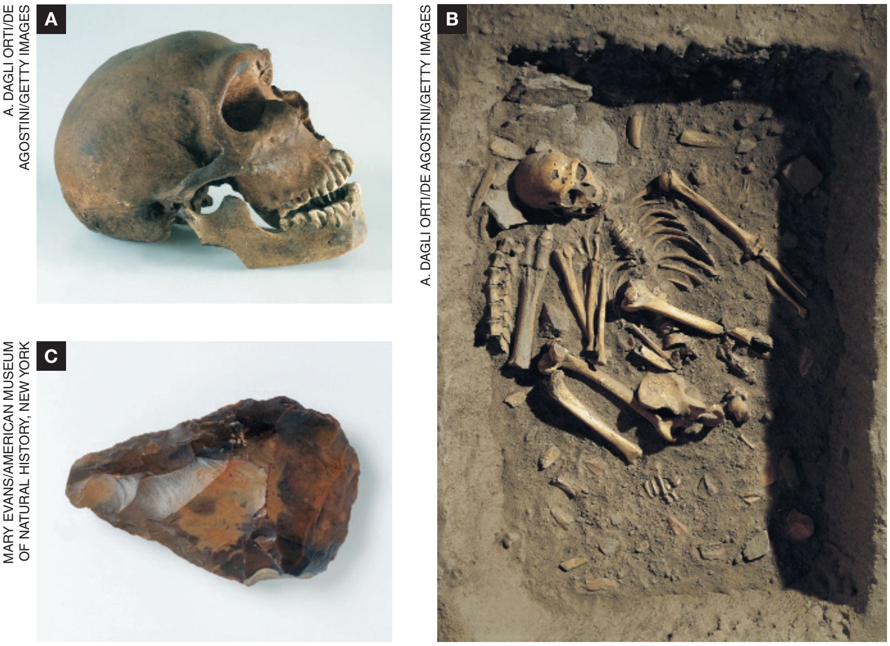

B
Neandertalense
Humano moderno



TOM MCHUGH/SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

Figura 7.18 A. Representação esquemática das principais diferenças entre os esqueletos de *H. sapiens neanderthalensis* (à esquerda) e *H. sapiens sapiens* (à direita). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) **B.** Representação esquemática comparando os crânios de *H. sapiens neanderthalensis* e *H. sapiens sapiens*. As setas indicam, de cima para baixo, a testa mais oblíqua, a prega supraorbital mais desenvolvida, o queixo menos proeminente e a região craniana occipital mais alongada dos neandertais em relação ao ser humano moderno. **C.** Representação artística de um macho de *H. sapiens neanderthalensis*.

A descoberta de esqueletos fósseis de neandertalenses idosos leva a crer que eles tinham uma organização social suficientemente desenvolvida para permitir a sobrevivência até idades relativamente avançadas. Ao menos ocasionalmente, eles enterravam os mortos, às vezes com armas, utensílios, comida e enfeites supostamente pertencentes ao falecido. Alguns estudiosos veem nesse fato um indício de que os neandertalenses tinham desenvolvido rituais fúnebres, talvez relacionados à crença em vida depois da morte, mas isso ainda é tema de debates. (Fig. 7.19)



A. DAGLI ORTI/DE AGOSTINI/GETTY IMAGES

A. DAGLI ORTI/DE AGOSTINI/GETTY IMAGES

MARY EVANS/AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY, NEW YORK

Figura 7.19 A. Crânio fossilizado de um neandertalense. **B.** Restos fósseis do esqueleto de um neandertalense em uma câmara de sepultamento, datado de cerca de 50 mil anos, encontrado na França. **C.** Ferramenta de pedra lascada atribuída a neandertalenses, encontrada em Kent, Inglaterra.

O desaparecimento dos neandertalenses do documentário fóssil, de 25 mil anos para cá, mostra sua completa extinção, que pode ser atribuída tanto a grandes mudanças climáticas quanto à interação com seres humanos modernos – ***Homo sapiens sapiens*** –, que chegaram ao Oriente Médio e à Europa entre 40 mil e 35 mil anos atrás, provenientes provavelmente da Ásia. Culturalmente mais avançados que os neandertalenses e mais bem adaptados ao clima mais quente da época, competiram com eles levando grande vantagem. (Fig. 7.20)

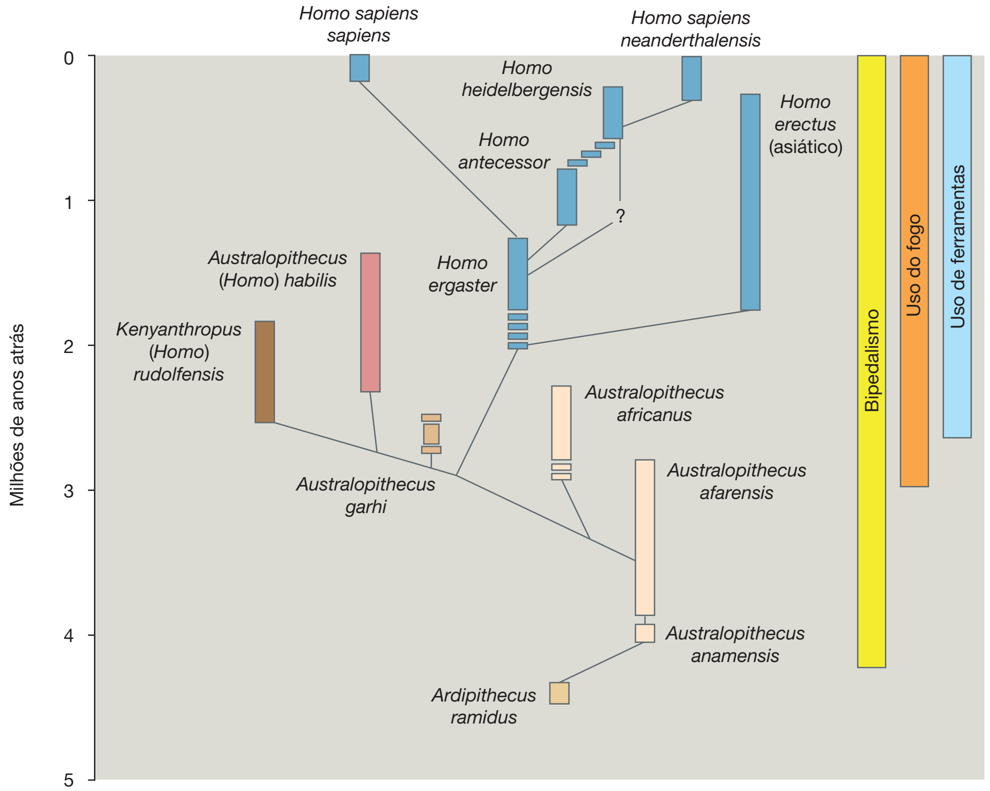

Milhões de anos atrás
0
1
2
3
4
5
Homo sapiens sapiens
Homo sapiens neanderthalensis
Homo heidelbergensis
Homo antecessor
?
Homo erectus (asiático)
Australopithecus (Homo) habilis
Homo ergaster
Kenyanthropus (Homo) rudolfensis
Australopithecus africanus
Australopithecus garhi
Australopithecus afarensis
Australopithecus anamensis
Ardipithecus ramidus
Bipedalismo
Uso do fogo
Uso de ferramentas

Figura 7.20 Árvore evolutiva relacionando diversos fósseis conhecidos da linhagem humana; os retângulos indicam os períodos aproximados de existência do grupo, e as linhas, possíveis relações de parentesco evolutivo entre eles.

ILUSTRAÇÃO: LUIZ RUBIO

Amplie seus conhecimentos

Estudos moleculares de hominídeos fósseis

Em 1997, os geneticistas conseguiram extrair e caracterizar DNA mitocondrial de um osso fóssil de *H. sapiens neanderthalensis* de mais de 30 mil anos de idade. Comparando esse DNA ao de seres humanos modernos, concluiu-se que os dois grupos compartilharam um ancestral comum há mais ou menos 500 mil anos. Estudos mais recentes, porém, indicam que o ponto de divergência entre nós e os neandertalenses é mais antigo, por volta de 800 mil anos atrás.

Em 2010, foi concluído o sequenciamento do genoma do *H. sapiens neanderthalensis*. Além de confirmar as estimativas anteriores, de 99,5% de identidade do genoma neandertalense com o genoma dos seres humanos modernos, os estudos mostraram que entre 1% e 4% do DNA de pessoas de etnia não africana é de origem neandertalense; por outro lado, nenhum vestígio de DNA neandertalense é encontrado em populações africanas que vivem ao sul do Saara. O geneticista suíço que liderou esse projeto de sequenciamento, Svante Pääblo (1955-), resumiu o achado dizendo que todas as pessoas que descendem da linhagem humana que se expandiu para fora da África carregam um pouco de DNA neandertalense.

VOLKER STEGER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

A extração, a purificação e o sequenciamento de DNA de fósseis demandam o uso de técnicas sofisticadas e cuidados rigorosos para evitar tanto a degradação da amostra quanto sua contaminação com DNA do pesquisador. Na foto, um cientista trabalha na extração de DNA de neandertalense em um ambiente asséptico e protegido.

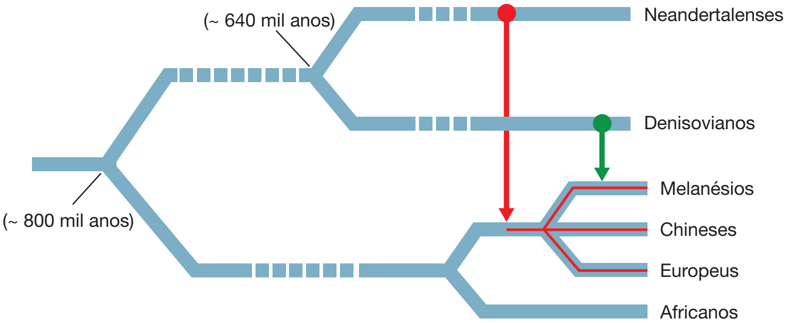
A presença de sequências de DNA tipicamente neandertalense no genoma humano moderno (e a ausência de DNA de seres humanos modernos no genoma neandertalense) pode ser explicada admitindo-se cruzamentos entre membros das duas subespécies, logo após a entrada dos humanos modernos na Europa e no Oriente Médio. Indica, também, que o contato inicial teria sido entre uma pequena população de *H. sapiens sapiens* e uma população bem maior de *H. sapiens neanderthalensis*.

Em 2008, na caverna denominada Denisova, localizada nas montanhas Altai, na Sibéria, foram encontrados um fragmento ósseo de um dedo e um dente, com idade estimada em 41 mil anos. Como havia indícios de que a caverna tinha sido habitada tanto por seres humanos modernos quanto por neandertalenses, levantou-se a questão: a qual dessas espécies pertenciam os fósseis encontrados?

Os pesquisadores conseguiram extrair DNA dos fósseis, bem conservados graças às condições climáticas de baixa umidade e temperatura reinantes na caverna. Com isso, foi possível sequenciar praticamente todo o genoma, mostrando que ele pertenceu a um novo hominídeo, provisoriamente chamado **povo denisoviano**.

Uma comparação detalhada dos genomas permitiu estimar que a divergência entre as linhagens denisoviana e neandertalense ocorreu há 640 mil anos; a separação entre os denisovianos e os seres humanos modernos aconteceu por volta de 800 mil anos atrás.

Ao se comparar o DNA denisoviano com o DNA de diversas populações humanas atuais, descobriu-se que entre 4% e 6% do genoma dos melanésios, povo que vive atualmente em Papua Nova Guiné e na Ilha Bougainville, na Oceania, é constituído por sequências de DNA derivadas do genoma denisoviano. Além dos melanésios, os aborígenes australianos e o povo negrito do sudeste da Ásia também possuem DNA denisoviano em seus genomas, indicando miscigenação entre eles e a linhagem humana moderna, ancestral das populações do sudeste asiático e da Austrália.



LUIZ RUBIO

Relações evolutivas com base na comparação entre DNAs de seres humanos modernos de diferentes etnias e DNAs de neandertalenses e denisovianos. As setas vermelha e verde indicam fluxo gênico decorrente de cruzamentos de seres humanos modernos com neandertalenses e denisovianos, respectivamente.

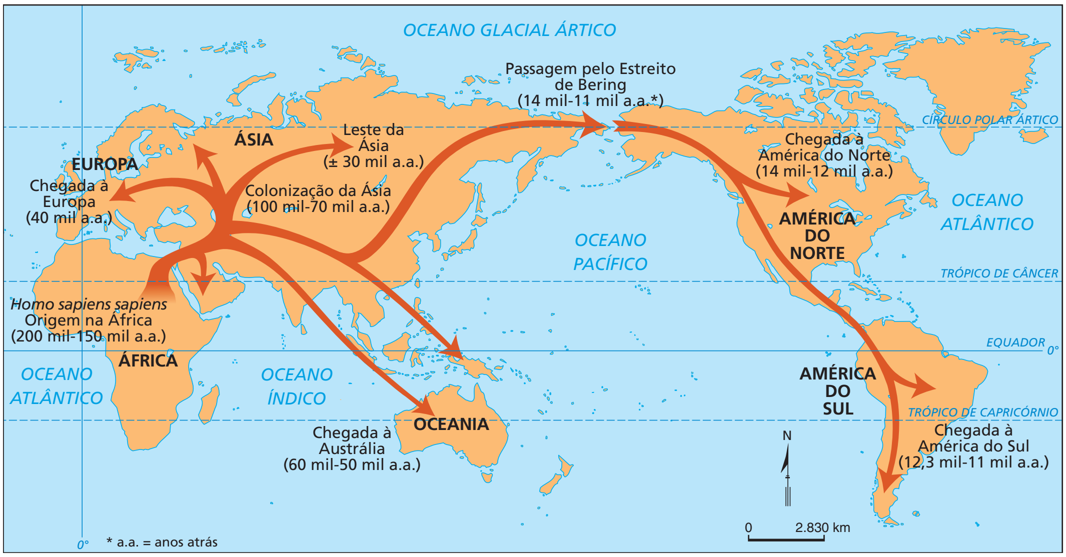
A espécie humana moderna: *Homo sapiens sapiens*

Os primeiros esqueletos fósseis indistinguíveis de um ser humano moderno foram encontrados, em 1868, num abrigo rochoso no sudoeste da França, em Cro-Magnon. Esses fósseis, datados entre 23 mil e 27 mil anos atrás, receberam a denominação informal de povo de Cro-Magnon. Grande número de fósseis descobertos posteriormente em diversas regiões da Europa e da Ásia permitiu concluir que os seres humanos modernos chegaram à Ásia entre 70 mil e 100 mil anos atrás, e ao Oriente Médio e à Europa por volta de 40 mil anos atrás.

Em sítios arqueológicos da África com idades entre 195 mil e 115 mil anos, foram encontrados fósseis que denotam mudanças em relação à forma craniana dos seres humanos atuais. As descobertas mostram que a espécie humana moderna iniciou sua evolução na África, por volta de 200 mil anos atrás, provavelmente a partir de linhagens de *H. ergaster*. Daí teria irradiado para fora da África e colonizado os outros continentes.

Estima-se que humanos modernos oriundos da Ásia chegaram à Austrália entre 60 mil e 50 mil anos atrás, tendo sido os ancestrais dos aborígenes australianos. Quanto à chegada dos seres humanos nas Américas, as polêmicas ainda são grandes; a hipótese mais conservadora admite que grupos humanos provenientes da Ásia atravessaram o Estreito de Bering e chegaram ao continente americano por volta de 14 mil anos atrás. Outras hipóteses admitem diversas migrações, inclusive com etnias diferentes, e que as mais antigas podem ter ocorrido por volta de 40 mil anos atrás. (Fig. 7.21)

Irradiações de *Homo sapiens sapiens* para as diversas partes do mundo


OCEANO GLACIAL ÁRTICO
Passagem pelo Estreito de Bering (14 mil-11 mil a.a.*)
CÍRCULO POLAR ÁRTICO
EUROPA
ÁSIA
Leste da Ásia (± 30 mil a.a.)
Chegada à Europa (40 mil a.a.)
Colonização da Ásia (100 mil-70 mil a.a.)
Chegada à América do Norte (14 mil-12 mil a.a.)
AMÉRICA DO NORTE
OCEANO ATLÂNTICO
OCEANO PACÍFICO
TRÓPICO DE CÂNCER
Homo sapiens sapiens Origem na África (200 mil-150 mil a.a.)
ÁFRICA
EQUADOR 0°
OCEANO ATLÂNTICO
OCEANO ÍNDICO
AMÉRICA DO SUL
TRÓPICO DE CAPRICÓRNIO
OCEANIA
Chegada à Austrália (60 mil-50 mil a.a.)
N
Chegada à América do Sul (12,3 mil-11 mil a.a.)
0 2.830 km
0°
* a.a. = anos atrás

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

Figura 7.21 Mapa mostrando as irradiações de *Homo sapiens sapiens*. Segundo a hipótese mais aceita atualmente, a espécie humana moderna surgiu na África, possivelmente a partir de *H. ergaster*, de onde se irradiou para as diversas partes do mundo. (Elaborado com base em Neves, W. A. e Hubbe, M., 2003.)

Evolução e cultura

Na linhagem hominídea, paralelamente à evolução do encéfalo ocorreu o desenvolvimento da linguagem simbólica. Esta consiste em associar objetos e eventos do mundo a suas representações mentais — os símbolos —, permitindo expressar ideias, experiências e sentimentos.

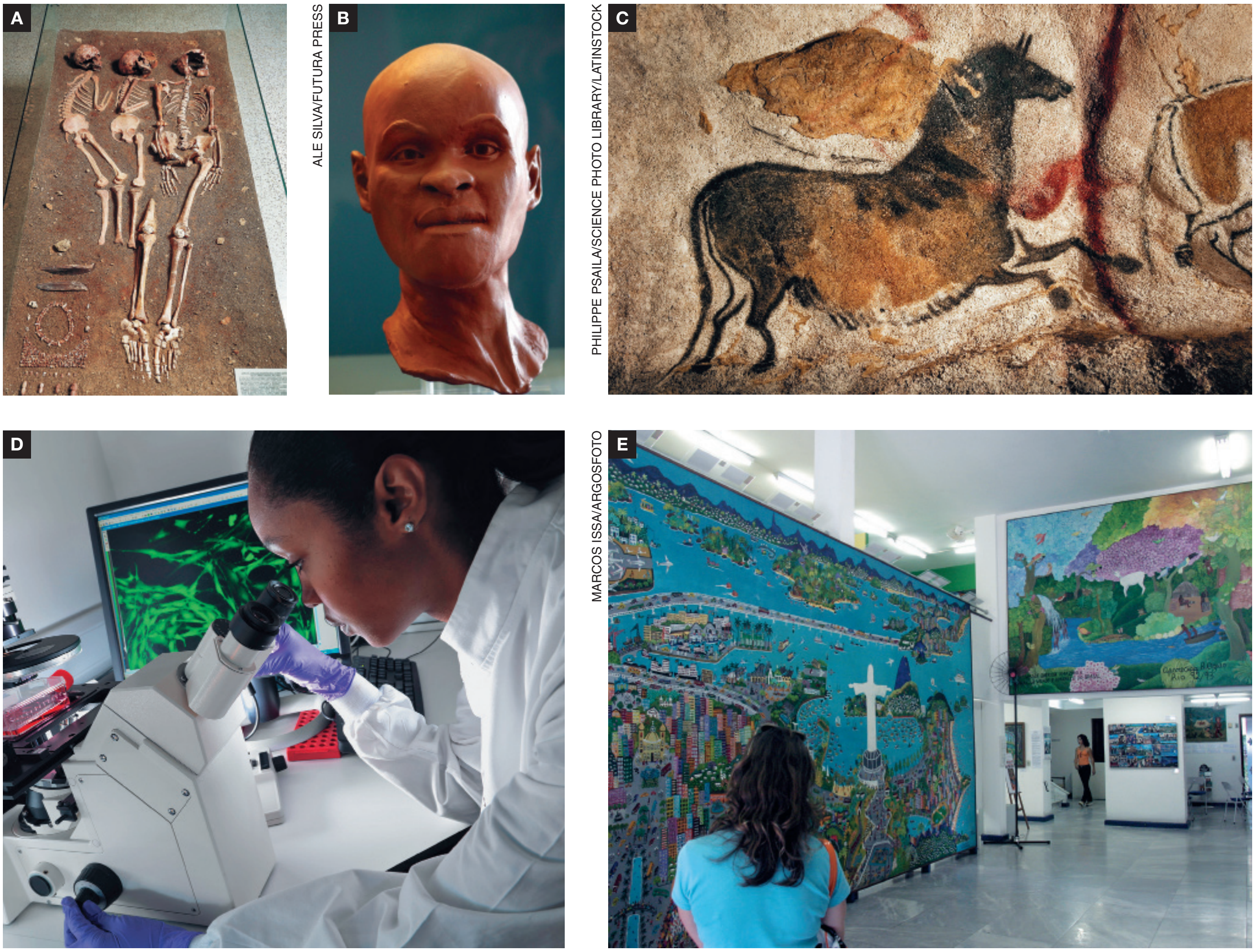
A linguagem simbólica não é apenas uma forma de expressão, mas está fundamentalmente associada ao próprio processo de pensamento humano. Ela foi a principal inovação evolutiva da linhagem humana e continua a ser a principal fonte de sua criatividade.

O desenvolvimento da linguagem simbólica está intimamente correlacionado à evolução do pensamento abstrato, que consiste na representação mental de eventos e objetos sem sua presença concreta. O pensamento abstrato permite relacionar memórias de ocorrências no passado com o presente, possibilitando fazer previsões sobre o futuro. Por exemplo, com base em uma série de memórias sobre os hábitos de um animal, é possível prever como ele poderá reagir em certa situação hipotética. Essa dimensão histórica que o ser humano tem de si mesmo foi e continua a ser fundamental para a evolução de nossa cultura.

Pode-se definir **cultura** como o conjunto de conhecimentos e experiências acumulados pelas populações humanas e transmitidos ao longo das gerações. A cultura também é um processo pelo qual cada pessoa, individualmente, e a humanidade, como um todo, extraem e acumulam conhecimentos a partir das experiências vividas e da reflexão sobre elas.

Talvez o salto mais prodigioso da humanidade rumo ao conhecimento tenha sido o desenvolvimento da escrita, que ocorreu há cerca de 10 mil anos. Desde então, as gerações humanas passaram a deixar para as gerações seguintes informações registradas sobre seu modo de vida e suas realizações. A civilização que hoje conhecemos, com cidades, monumentos, obras artísticas, filosofias, religiões, ciência e tecnologia, só foi possível graças à incrível quantidade de conhecimentos escritos e transmitidos de geração em geração.

O impacto da cultura humana tornou-se mais acentuado a partir da Revolução Industrial, que ocorreu há pouco mais de 200 anos. Desde então, o ritmo de evolução cultural e tecnológica acelerou-se, particularmente no Ocidente, levando a humanidade a enfrentar os maiores desafios de sua história: alimentar a imensa e crescente população humana e preservar o ambiente terrestre para as gerações vindouras. Embora seja praticamente impossível prever o futuro da humanidade, podemos dizer que a cultura humana dispõe de potencial para resolver seus problemas e para continuar sua história evolutiva no planeta, quem sabe, por muito tempo. (Fig. 7.22)



A. DE GREGORIO/DE AGOSTINI/DIOMEDIA

ALE SILVA/FUTURA PRESS

PHILIPPE PSAILA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

CORFIELD/ALAMY/GLOW IMAGES

MARCOS ISSA/ARGOSFOTO

Figura 7.22 A cultura e a tecnologia são características específicas da espécie humana moderna. **A.** Esqueletos fossilizados do povo de Cro-Magnon. **B.** Reconstrução artística do rosto de Luzia, considerado o fóssil humano mais antigo da América do Sul, com idade estimada em 11.500 anos. Esse fóssil foi encontrado no sítio arqueológico de Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Minas Gerais. **C.** Pinturas rupestres da caverna de Lascaux, feitas há aproximadamente 17 mil anos (França, 2010). **D.** Pesquisadora utilizando microscópio fotônico, um exemplo de tecnologia contemporânea. **E.** Visitante apreciando a pintura *Rio de Janeiro, gosto de você, gosto dessa gente feliz*, de Lia Mittarakis, no Museu Internacional de Arte Naïf, no Rio de Janeiro.

Ao trabalhar com este texto, enfatize a falta de fundamento científico para a existência de raças humanas e, portanto, do preconceito racial, que ainda permeia parte da sociedade no Brasil e no mundo. Estimule os alunos a refletir sobre a utilização de argumentos pseudocientíficos na tentativa de justificar preconceitos de caráter racista.

Receita para uma humanidade desracializada

Nesta seção, reproduzimos parte do artigo de Sergio Danilo Pena, professor titular do Departamento de Bioquímica e Imunologia da Universidade Federal de Minas Gerais.

"[...]

Diversidade geográfica humana e 'raças'

1 Quando estudamos os seres humanos, também observamos uma grande diversidade morfológica, que pode ser descrita em dois níveis diferentes. O primeiro é o nível interpessoal, a diversidade que distingue uma pessoa da outra na mesma população e que está intimamente ligada à identidade individual. O segundo é o nível interpopulacional, ou seja, a diversidade morfológica que caracteriza populações, especialmente grupos de diferentes continentes.

2 A segunda diversidade é relevante, pois historicamente tem servido de base para a divisão da humanidade em 'raças'. A mais influente proposta neste sentido foi a do antropólogo alemão Johann Friedrich Blumenbach (1752-1840). Em seu livro *De generis humani varietate nativa* (*Das variedades naturais da humanidade*) propôs a existência de cinco principais 'raças' humanas: a caucasoide, a mongoloide, a etiópica, a americana e a malaia.

3 A 'raça' que incluía os nativos da Europa, Oriente Médio, Norte da África e Índia foi chamada 'caucasoide', porque Blumenbach achava que o 'tipo' humano perfeito era o encontrado nos habitantes das montanhas do Cáucaso. Essa classificação persistiu até o século XX, quando foi demonstrado, como veremos a seguir, que é impossível separar a humanidade em categorias raciais biologicamente significativas, independentemente do critério adotado.

Diversidade genômica humana

4 A descrição das variabilidades morfológicas interpessoal e interpopulacional pertence à esfera das aparências, ao mundo fenotípico. Se agora penetrarmos no mundo genômico, o quadro muda consideravelmente. Subjacente à individualidade morfológica das pessoas realmente existe uma individualidade genômica absoluta. Estudos em DNA demonstram que cada ser humano é genomicamente diferente de todos os outros, com exceção de gêmeos idênticos.

5 No entanto, a representação genômica da variabilidade entre os grupos humanos dos diferentes continentes – ou seja, as ditas 'raças' humanas – é muito pequena. As características físicas desses grupos na realidade representam adaptações morfológicas ao meio ambiente, sendo assim produtos da seleção natural agindo sobre um pequeno número de genes.

6 Acredita-se, por exemplo, que dois fatores seletivos servem para adaptar a cor da pele aos níveis de radiação ultravioleta do ambiente geográfico: a destruição do ácido fólico quando é excessiva e a falta de síntese de vitamina D3 na pele quando ela é insuficiente. A cor da pele é determinada pela quantidade e tipo do pigmento melanina na derme, que são controlados por poucos genes (de quatro a seis), dos quais o mais importante parece ser o gene do receptor do hormônio melanotrópico.

7 Da mesma maneira que a cor da pele, outras características físicas externas como o formato da face, da fissura palpebral, dos lábios, do nariz e a cor e a textura do cabelo são traços literalmente superficiais. Embora não conheçamos os fatores geográficos locais responsáveis pela seleção dessas características, é razoável assumir que esses traços morfológicos espelhem adaptações ao clima e outras variáveis ambientais de diferentes partes da Terra.

8 Assim como a cor da pele, essas características físicas das porções expostas do corpo dependem da expressão de poucos genes. Resumo da ópera: as diferenças icônicas das chamadas 'raças' humanas correlacionam-se bem com o continente de origem, mas dependem de uma porção ínfima dos cerca de 25.000 genes estimados do genoma humano.

9 Em outras palavras, pode parecer fácil distinguir fenotipicamente um europeu de um africano ou de um asiático, mas tal facilidade desaparece completamente quando procuramos evidências dessas diferenças 'raciais' no genoma das pessoas. ▶

As diferenças entre os grupos humanos continentais – ou seja, o que se costumava chamar 'raças' humanas – estão literalmente à flor da pele!

10 Em uma conferência proferida em 2004 na Universidade de Berkeley (EUA), o brilhante geneticista norte-americano Richard Lewontin (1929-) fez uma importante observação a respeito dos níveis de diversidade humana. Uma marca de preconceito é ver a humanidade em termos apenas interpopulacionais, ou seja, a inabilidade de reconhecer em outros grupos 'raciais' a individualidade de cada pessoa. Isto é frequentemente expresso na frase: '*eles* parecem todos iguais, mas nós somos todos diferentes uns dos outros'. Ao ser negada a individualidade dos membros de outros grupos, eles são objetivados, desumanizados. É igual dizer: 'eu sei a 'raça' a que ele(a) pertence, portanto já sei tudo que é possível saber a respeito dele(a)'.

A inexistência biológica de 'raças' humanas

11 É possível saber qual proporção da variabilidade genômica humana ocorre em nível interpessoal (dentro das populações) e qual proporção é interpopulacional (entre as populações)? A resposta é *sim*. Em 1972, Lewontin compilou da literatura científica as frequências alélicas de 17 polimorfismos genéticos clássicos disponíveis na época (incluindo grupos sanguíneos, proteínas séricas e isoenzimas) de diferentes populações. A partir desses dados, ele agrupou as diferentes populações em 'grupos raciais' definidos de acordo com Blumenbach e calculou a diversidade dentro desses grupos e entre eles.

12 O resultado foi que 85,4% da diversidade alélica ocorria dentro das próprias populações, 8,3% entre as populações de uma mesma 'raça' e apenas 6,3% entre as chamadas 'raças'!!! Recentemente, nosso grupo de pesquisa na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), trabalhando com 40 polimorfismos de inserção-deleção de DNA em 1.064 indivíduos de todo o globo, confirmou amplamente os resultados de Lewontin (este estudo foi publicado no periódico *Annals of Human Genetics*).

13 A constatação de que uma parte muito pequena da variação genômica humana ocorre entre as supostas 'raças' leva necessariamente à conclusão de que elas não são significativas do ponto de vista genético ou biológico. Duas outras linhas separadas de pesquisa dão suporte científico a essa inexistência de 'raças' humanas. A primeira é a constatação de que a espécie humana é muito jovem e seus padrões migratórios demasiadamente amplos para permitir uma diferenciação e consequentemente separação em diferentes grupos biológicos que pudessem ser chamados de 'raças'. A segunda é a observação de que uma proporção pequena de todos os alelos de polimorfismos humanos é vista em apenas um continente, ou seja, a vasta maioria da variabilidade genômica é compartilhada entre as chamadas 'raças'.

Por uma humanidade desracializada

14 O fato assim cientificamente comprovado da inexistência das 'raças' deve ser absorvido pela sociedade e incorporado às suas convicções e atitudes morais. Uma postura coerente e desejável seria a construção de uma sociedade desracializada, na qual a singularidade do indivíduo seja valorizada e celebrada. Temos de assimilar a noção de que a única divisão biologicamente coerente da espécie humana é em bilhões de indivíduos e não em um punhado de 'raças'.

15 Há um poema atribuído ao romano Virgílio (70 a.C.-19 a.C.) no qual ele descreve a feitura do *moretum*, uma massa não fermentada, assada, recheada com vinagre e azeite, coberta com fatias de alho e cebola crua (há quem acredite que o *moretum* é um dos precursores da *pizza*). Na receita, Virgílio descreve como as várias cores dos diferentes ingredientes vão se mesclando e se unindo: *It manus in gyrum: paulatim singula vires deperdunt proprias; color est e pluribus unus*. (Minha tradução: Sua mão se move em círculos, até que um por um eles perdem seus próprios poderes, e, entre tantas cores, uma única emerge.)

16 Nesta época atual de conflitos de civilizações e recrudescimento de ódio étnico e racismo, precisamos esquecer as diferenças superficiais de cor entre os grupos continentais (vulgos 'raças') e por trás da enorme diversidade humana distinguir uma espécie única composta de indivíduos igualmente diferentes e irmãos. *Color est e pluribus unus*."

Fonte: PENA, S. D. Receita para uma humanidade desracializada. *Ciência Hoje*, 2009. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/deriva-genetica/receita-para-uma-humanidade-desracializada>. Acesso em: mar. 2016.

Aproveite o Guia de leitura e peça aos alunos que tragam materiais e dúvidas sobre esse tema para discutir em sala de aula. Com esse material, faça uma discussão coletiva, confrontando temas culturais trazidos por eles com aspectos científicos do texto.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

No artigo, do qual omitimos os dois parágrafos introdutórios, o Prof. Pena discute a tese da inexistência das "raças" humanas. Uma vez que a questão racial está por trás de diversas formas de injustiça, que vão desde piadas supostamente inofensivas até perseguições políticas e conflitos violentos entre grupos distintos, a leitura desse artigo fornece informações importantes para refletirmos sobre o tema e avaliarmos nossas crenças e comportamentos. A seguir, apresentamos um roteiro de atividades para orientar sua leitura e ajudá-lo na assimilação das ideias expostas.

1 Leia o primeiro parágrafo e indique quais são os dois níveis de diversidade morfológica comentados. A seguir, liste alguns exemplos que possam tornar mais claros esses conceitos. Para ajudar na sua reflexão, pense nisto: você como indivíduo (nível interpessoal) e também como parte de um grupo populacional (nível interpopulacional).

2 No segundo e no terceiro parágrafos, o autor apresenta e comenta a divisão clássica da humanidade em "raças". Você já tinha ouvido falar em "raças" de seres humanos? Em caso afirmativo, as "raças" que você conhecia são as mesmas citadas pelo autor? Se você já ouviu alguma menção a algumas dessas "raças", escreva um comentário mencionando as características que são geralmente atribuídas a elas. Note que o Prof. Pena sempre escreve o termo "raça" entre aspas, antecipando sua opinião sobre o assunto que será tratado no artigo.

3 Leia o quarto parágrafo, que faz parte do item "Diversidade genômica humana". Em sua opinião, qual é o argumento central que o autor pretende expor nesse trecho do artigo? Resuma-o em uma frase, com suas próprias palavras.

4 No quinto parágrafo, o Prof. Pena comenta que a variedade genômica entre as ditas "raças" humanas é muito pequena. O que ele quer dizer com isso, no contexto do parágrafo e do texto? Eventualmente, você poderá rever essa resposta se encontrar outras informações relevantes a respeito nos parágrafos subsequentes.

5 Informe-se, no sexto parágrafo, sobre a relação adaptativa entre a cor da pele e o ambiente geográfico em que as populações humanas evoluíram e se adaptaram. Analise cuidadosamente o texto do autor. Note que a adaptação que previne a destruição do ácido fólico pelo excesso de radiação UV, em regiões tropicais e subtropicais, consiste na produção de mais melanina na pele, originando pele mais escura. Por outro lado, em regiões temperadas e com menor índice de radiação UV, o fator seletivo é a síntese de vitamina D na pele, processo que requer a participação da radiação ultravioleta; a adaptação às regiões temperadas, segundo o que defende o autor do artigo, consistiu na produção de menor quantidade de melanina, resultando em pele mais clara.

6 Leia o sétimo e o oitavo parágrafos e responda: qual é o argumento central desses trechos? Resuma-o em uma frase.

7 No nono parágrafo, o autor afirma que as "diferenças entre os grupos humanos continentais – ou seja, o que se costumava chamar 'raças' humanas – estão literalmente à flor da pele!". O que você acha que ele quer dizer com isso?

8 Leia o décimo parágrafo do artigo, que cita o geneticista Richard Lewontin e comenta como a divisão da humanidade em "raças" pode dar margem a preconceitos. Escreva um pequeno texto sobre o que achou mais interessante no parágrafo.

9 Leia os parágrafos 11 e 12, no item "A inexistência biológica de 'raças' humanas". Neles, o autor apresenta os trabalhos de Lewontin e de seu grupo de pesquisadores brasileiros sobre o nível em que ocorre a variabilidade das chamadas "raças" humanas de acordo com a divisão de Blumenbach. A que conclusões eles chegaram?

10 Leia o parágrafo 13 e confronte-o com as conclusões a que chegou no item anterior, analisando se a ideia central desse trecho do texto está de acordo com o que você havia pensado. Que outras linhas de argumentação, segundo o trecho, dão suporte à tese da inexistência de "raças" humanas?

11 Leia a seguir o parágrafo 14, no item "Por uma humanidade desracializada". Qual é o seu argumento central? Resuma-o em uma frase.

12 Nos parágrafos 15 e 16 é citado o poeta romano Virgílio, em uma alegoria sobre a importância de se modificar a divisão da humanidade em "raças", em prol de uma espécie "composta de indivíduos igualmente diferentes e irmãos". Certifique-se de ter compreendido a comparação do autor ao *moretum*. Escreva um pequeno texto que comente e opine sobre as propostas do autor em seu artigo.

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

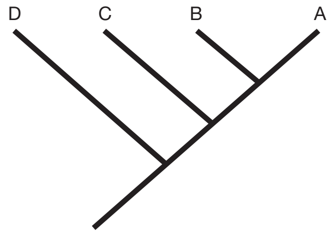
1. Qual é o nome científico dos seres humanos modernos? 1. d

a) *Homo erectus*.
b) *Homo habilis*.
c) *Homo sapiens neanderthalensis*.
d) *Homo sapiens sapiens*.

2. Quais são os macacos que apresentam maior semelhança genética com os seres humanos? 2. b

a) Babuínos.
b) Chimpanzés.
c) Gorilas.
d) Orangotangos.

3. Na árvore filogenética, considere que A representa seres humanos. Que animais representariam B, C e D, respectivamente? 3. a



ADILSON SECCO

a) Chimpanzés, gorilas e orangotangos.
b) Chimpanzés, orangotangos e gorilas.
c) Gorilas, chimpanzés e orangotangos.
d) Gorilas, orangotangos e chimpanzés.

Escreva, em seu caderno, o termo abaixo que substitui corretamente a tarja entre parênteses nas frases de 4 a 7.

a) 200 mil anos
b) 2 milhões de anos
c) 8 milhões de anos
d) 45 milhões de anos

4. O ancestral comum a seres humanos e chimpanzés viveu há aproximadamente (▬▬). 4. c

5. A espécie humana moderna – *Homo sapiens sapiens* – surgiu há aproximadamente (▬▬). 5. a

6. O ancestral comum dos macacos viveu há aproximadamente (▬▬). 6. d

7. O surgimento do *Homo erectus* a partir de grupos ancestrais de australopitecos teria ocorrido há cerca de (▬▬). 7. b

Escreva, em seu caderno, o termo abaixo que substitui corretamente a tarja entre parênteses nas frases de 8 a 11.

a) bipedalismo
b) cuidado com a prole
c) polegar oponível
d) visão estereoscópica

8. A(O) (▬▬) possibilitou aos hominídeos um aumento significativo da transmissão cultural. 8. b

9. A construção de objetos e de ferramentas dependeu, em grande parte, de um caráter adaptativo desenvolvido por nossa ancestralidade em sua vida nas árvores – a(o) (▬▬) –, que permitiu pegar objetos com força e precisão. 9. c

10. A(O) (▬▬) possibilitou aos hominídeos enxergar mais longe e liberar as mãos para arremessar objetos, por exemplo. Em contrapartida, exigiu grandes adaptações na coluna vertebral e no esqueleto. 10. a

11. A capacidade de calcular as distâncias antes de saltar, graças à(ao) (▬▬), foi importante na vida arborícola e complementou as habilidades da linhagem humana. 11. d

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

12. Faça uma pesquisa, por conta própria ou com um grupo de colegas, sobre o que as pessoas pensam a respeito da origem da espécie humana. Entreviste pessoas com diferentes graus de escolaridade e que exerçam atividades diversas, tais como médicos, padres ou outros religiosos, empregados domésticos, engenheiros etc. Elabore as perguntas com antecedência; questione o entrevistado, por exemplo, se sabe o que afirma a teoria da evolução e se acredita ou não que ela explica a origem da espécie humana; se tem ideia de há quanto tempo surgiu a espécie humana; se já ouviu sobre fósseis humanos etc. Ao entrevistar cada pessoa, lembre-se de perguntar qual é seu grau de escolaridade, sua profissão, sua religião e sua idade. Grave (com autorização dos entrevistados) ou anote as respostas. Organize os dados da entrevista em uma tabela e discuta-os com os colegas. Calcule as porcentagens dos que responderam afirmativamente e negativamente à ideia da origem evolutiva da espécie humana e compare com dados de pesquisas semelhantes em nível nacional e internacional que podem ser obtidos na internet. Elabore um texto argumentativo confrontando sua opinião pessoal com o resultado da pesquisa.

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

13. Divulgação científica: O adeus às árvores

O interesse da sociedade pelas novas descobertas científicas cresce a cada dia. Isso é atestado pela publicação quase simultânea, em diversos meios de comunicação de grande circulação, de uma descoberta importante na área de evolução humana, como você verá nas duas reportagens que reproduzimos a seguir.

Seu desafio, nesta atividade, é utilizar ideias dessas duas matérias jornalísticas para elaborar sua própria reportagem, intitulada *O adeus às árvores*. O ponto central do texto deve ser a transição, na nossa ancestralidade, do estilo de vida arborícola para a vida no solo. Individualmente ou em grupo, pesquise imagens e informações adicionais neste capítulo e em outras fontes confiáveis. Elabore um texto de divulgação científica de até 10 parágrafos. Se possível, inclua em sua matéria um infográfico, nos moldes dos que temos analisado neste livro.

Ancestral humano já andava ereto, mas preferia viver em árvores

O *Australopithecus afarensis*, um dos mais antigos ancestrais dos humanos modernos, que viveu na África entre 3,9 e 2,9 milhões de anos atrás, já andava ereto, mas ainda assim preferia passar boa parte do seu tempo nas árvores. A conclusão é de estudo que analisou os ossos dos ombros de um raro fóssil bem preservado de uma jovem da espécie, batizada “Selam”, e publicado na edição desta semana da revista *Science*. Segundo os pesquisadores, as omoplatas de Selam têm características que se assemelham mais às de outros primatas do que às do *Homo sapiens*, um forte indicativo de que a espécie mantinha um estilo de vida arbóreo.

— A questão se o *Australopithecus afarensis* era estritamente bípede ou se também trepava em árvores tem sido objeto de um intenso debate há mais de 30 anos — disse David Green, professor da Universidade Midwestern, nos EUA, e um dos autores do estudo. — Esse fóssil excepcional, no entanto, deu-nos fortes evidências de que estes indivíduos ainda estavam subindo em árvores nesta etapa da evolução humana.

O exemplar mais famoso do *Australopithecus afarensis* é “Lucy”, um fóssil de 3,2 milhões de anos descoberto na Etiópia em 1974. Mas, apesar de os cientistas terem conseguido recuperar cerca de 40% de seu esqueleto, seus ombros foram perdidos para sempre. É neste ponto que Selam entra na história. Encontrado em 2000 na região de Dikika, também na Etiópia, por Zeresenay Alemseged, curador da seção de Antropologia da Academia de Ciências da Califórnia, o fóssil estava encapsulado em uma formação de arenito, garantindo sua preservação ao longo de milhões de anos.

— Como as omoplatas são finas como papel, elas raramente se fossilizam e, quando isso acontece, quase sempre estão totalmente fragmentadas — explicou Alemseged, que passou os últimos 11 anos cuidadosamente extraindo os ossos da rocha de arenito e é o principal autor do artigo publicado na *Science*. — Assim, encontrar ambas omoplatas completamente intactas e ainda conectadas ao esqueleto de uma espécie tão importante como esta foi como ganhar na loteria. Este estudo dá mais um passo para responder à pergunta: “quando nossos ancestrais abandonaram o hábito de viver em árvores?”. Aparentemente, isso só aconteceu muito depois do que outras pesquisas sugeriam.

Selam era uma menina de 3 anos que viveu há cerca de 3,3 milhões de anos e seu fóssil é o mais completo já encontrado de um *Australopithecus afarensis*. Depois de tirar as omoplatas do arenito, Green e Alemseged digitalizaram e fizeram um modelo em três dimensões dos ossos, caracterizando seu formato e função, e os compararam aos de outros ancestrais dos homens modernos, como o *Homo ergaster*, o *Homo floresiensis*, o *Australopithecus africanus* e dois exemplares adultos do próprio *Australopithecus afarensis*, além de uma extensa coleção de amostras de indivíduos jovens e adultos de chimpanzés, gorilas, orangotangos e humanos atuais.

De acordo com os pesquisadores, a análise comparativa de forma e função revelou que as omoplatas dos *Australopithecus afarensis* se parecem mais com as dos macacos, indicando uma vida de sobe e desce de árvores. Além disso, Green e Alemseged descobriram que, como os primatas atuais, a anatomia dos ombros dos exemplares jovens e adultos do *Australopithecus afarensis* era similar.

— A escápula humana muda de formato com o tempo de uma maneira significativamente diferente dos outros primatas — explicou Green. — Mas quando comparamos a escápula de Selam com exemplares adultos do *Australopithecus afarensis*, ficou claro que seu padrão de crescimento era mais consistente com o de outros primatas do que com o dos seres humanos.

Por outro lado, os pesquisadores destacaram que muitas das outras características do esqueleto de Selam, como os ossos da bacia, as pernas e os pés, são claramente humanizadas e adaptadas ao caminhar ereto.

— Estas descobertas confirmam a posição importante que a espécie de Lucy e Selam ocupa na evolução humana. Apesar de bípedes como os humanos, os *Australopithecus afarensis* ainda eram habilidosos escaladores. Embora não totalmente humanos, eles claramente estavam a caminho de serem humanos — concluiu Alemseged.

O Globo, Ciência, 26 ago. 2012.
Disponível em: <http://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/ancestral-humano-ja-andava-ereto-mas-preferia-viver-em-arvores-6533827>.
Acesso em: mar. 2016.

Ancestral humano andava ereto, mas subia em árvores como macacos

Há mais de três milhões de anos, os ancestrais dos humanos caminhavam eretos, mas ainda conseguiam subir em árvores como os macacos, indica um estudo publicado esta quinta-feira na revista científica americana *Science*.

Duas omoplatas extremamente bem preservadas de um hominídeo da mesma espécie da famosa Lucy, o primeiro ancestral bípede conhecido do *Homo sapiens*, mostram que essa espécie continuava também vivendo em árvores. As duas omoplatas fossilizadas, de uma menina *Australopithecus afarensis*, indicam pela primeira vez que esses hominídeos estavam bem adaptados morfologicamente para subir nos galhos. O esqueleto completo, batizado como Selam (3,3 milhões de anos), foi descoberto no ano 2000 na Etiópia. Trata-se do mais completo esqueleto da espécie já encontrado. Os pesquisadores demoraram 11 anos para conseguir remover as omoplatas.

"A questão de se o *Australopithecus*, cujo primeiro espécime, Lucy (3,5 milhões de anos), foi descoberto em 1974 na Etiópia, era estritamente bípede ou continuou evoluindo nas árvores, era objeto de debate há 30 anos", explicou David Green, professor de Paleobiologia da Universidade Midwestern em Illinois (Estados Unidos), um dos principais autores destes trabalhos. "Estas omoplatas fossilizadas proporcionam um indício sólido de que esses indivíduos continuavam subindo nas árvores nesse estágio da evolução humana", diz Green. Ele acredita que os ancestrais subiam para fugir de predadores ou por comida.

Na comparação entre a omoplata da menina *Australopithecus* com membros adultos da mesma espécie, fica evidente, afirma o professor, que as características de desenvolvimento se parecem mais com as do macaco. Ao mesmo tempo, muitos traços dos ossos do quadril, dos membros inferiores e dos pés dos *Australopithecus*, que permitiam o bipedismo, se parecem sem equívoco com os da espécie humana. Green explicou que ainda não se sabe quando os ancestrais de humanos deixaram de subir em árvores.

De acordo com outro autor do estudo, Zeresenay Alemseged, da Academia de Ciências da Califórnia, a descoberta confirma o lugar-chave ocupado por Lucy e a menina Selam na evolução humana. Isso porque o *Australopithecus afarensis* representa, na evolução, uma nova espécie de hominídeo, muito diferente da anterior, como o *Ardipithecus ramidus*, que não caminhava ereto ou não o fazia de forma permanente.

Os dois cientistas compararam as omoplatas de Selam com outros fósseis de ancestrais humanos como o *Homo ergaster*, *Homo floresiensis*, *A. africanus* e dois exemplares de *A. afarensis*. Eles também fizeram comparações com ossos modernos de chimpanzés, gorilas, orangotangos e humanos.

Para Zerenesay Alemseged, o achado permite progredir na busca por determinar quando nossos ancestrais pararam de subir em árvores para se tornarem estritamente bípedes. "Parece que isto ocorreu muito mais tarde do que pensava um grande número de pesquisadores."

David Green explica que o *Homo erectus*, um ancestral do *Homo sapiens* que vivia há 1,9 milhão de anos, tinha uma morfologia que o fazia mais similar aos humanos e parece ser, até o momento, a primeira espécie estritamente bípede. "Mas infelizmente entre Lucy, que viveu há 3,5 milhões de anos, e o *Homo erectus*, temos um longo período desconhecido que tentamos compreender com fósseis", conclui.

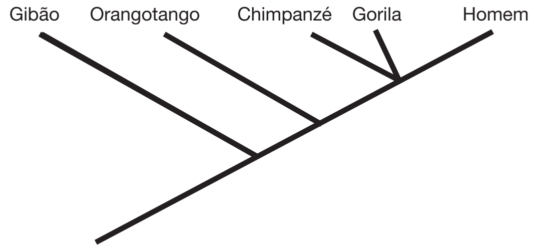
Revista *Veja*, 26 ago. 2012.
Disponível em: <http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/ancestral-humano-andava-como-homem-mas-subia-em-arvores-como-macacos>.
Acesso em: mar. 2016.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFS-SE) Considere a árvore filogenética a seguir.



ADILSON SECCO

Dos macacos antropoides representados no esquema, os que apresentam maior parentesco com o homem são o 1. c

a) chimpanzé e o orangotango.
b) orangotango e o gorila.
c) gorila e o chimpanzé.
d) gibão e o chimpanzé.
e) gorila e o gibão.

2. (Fuvest-SP) Pesquisadores descobriram na Etiópia fósseis que parecem ser do mais antigo ancestral da humanidade. Como a idade desses fósseis foi estimada entre 5,2 milhões e 5,8 milhões de anos, pode-se dizer que esses nossos ancestrais viveram 2. e

a) em época anterior ao aparecimento dos anfíbios e dos dinossauros.

b) na mesma época que os dinossauros e antes do aparecimento dos anfíbios.

c) na mesma época que os dinossauros e após o aparecimento dos anfíbios.

d) em época posterior ao desaparecimento dos dinossauros, mas antes do surgimento dos anfíbios.

e) em época posterior ao surgimento dos anfíbios e ao desaparecimento dos dinossauros.

3. (PUC-Minas) Recentes análises do DNA de chimpanzés permitiram concluir que o homem é mais aparentado com eles do que com qualquer outro primata. Isso permite concluir que 3. b

a) o chimpanzé é ancestral do homem.

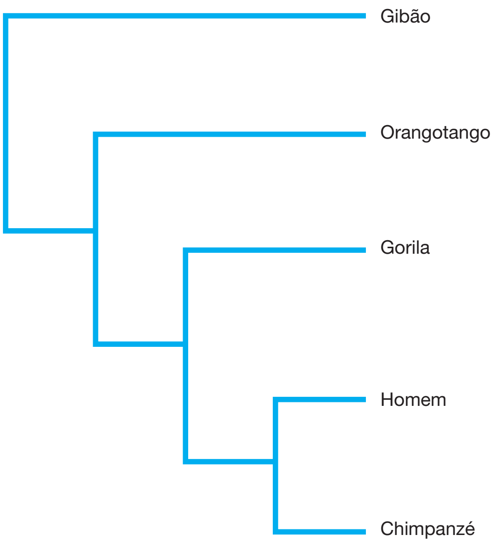
b) o chimpanzé e o homem têm um ancestral comum.

c) o homem e o chimpanzé são ancestrais dos gorilas.

d) a evolução do homem não foi gradual.

e) os chimpanzés são tão inteligentes quanto o homem.

4. (UFMS) A figura a seguir mostra uma das possíveis hipóteses sobre a filogenia dos primatas com origem no Velho Mundo, um grupo chamado Cercopithecidae.
Baseando-se nessa filogenia, determine a alternativa correta. 4. b


Gibão
Orangotango
Gorila
Homem
Chimpanzé

ADILSON SECCO

a) O homem surgiu antes dos outros primatas na história evolutiva do grupo.

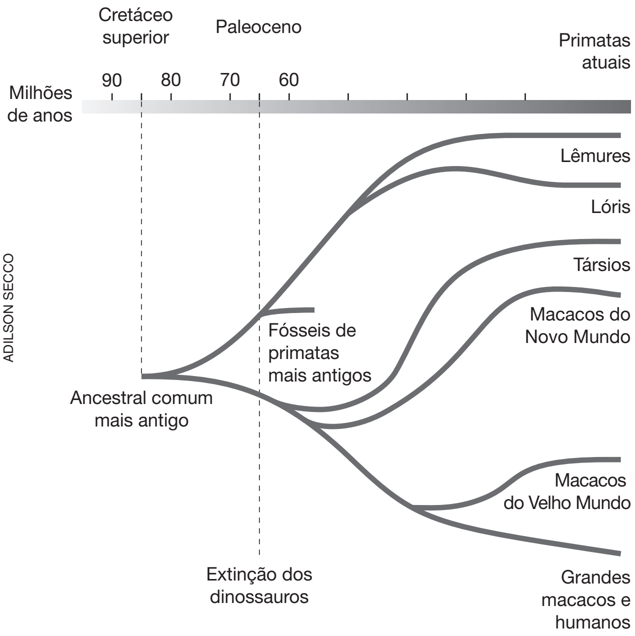
b) O gorila é mais próximo, filogeneticamente, do homem e do chimpanzé do que do orangotango e do gibão.

c) O chimpanzé é mais próximo, filogeneticamente, do gorila do que do homem.

d) O homem e o gorila deveriam ser incluídos em grupo taxonômico separado dos outros primatas.

e) Não é possível saber se o orangotango é mais próximo filogeneticamente do gibão ou dos outros primatas.

5. (Enem-MEC) Foi proposto um novo modelo de evolução dos primatas elaborado por matemáticos e biólogos. Nesse modelo o grupo de primatas pode ter tido origem quando os dinossauros ainda habitavam a Terra, e não há 65 milhões de anos, como é comumente aceito.


Cretáceo superior
Paleoceno
Primatas atuais
Milhões de anos
90
80
70
60
Lêmures
Lóris
Társios
Macacos do Novo Mundo
Fósseis de primatas mais antigos
Ancestral comum mais antigo
Macacos do Velho Mundo
Extinção dos dinossauros
Grandes macacos e humanos

ADILSON SECCO

(Fonte: Raquel Aguiar, *Ciência Hoje* on-line, 13/5/2002.)

Examinando esta árvore evolutiva podemos dizer que a divergência entre os macacos do Velho Mundo e o grupo dos grandes macacos e de humanos ocorreu há aproximadamente 5. d

a) 10 milhões de anos.

b) 55 milhões de anos.

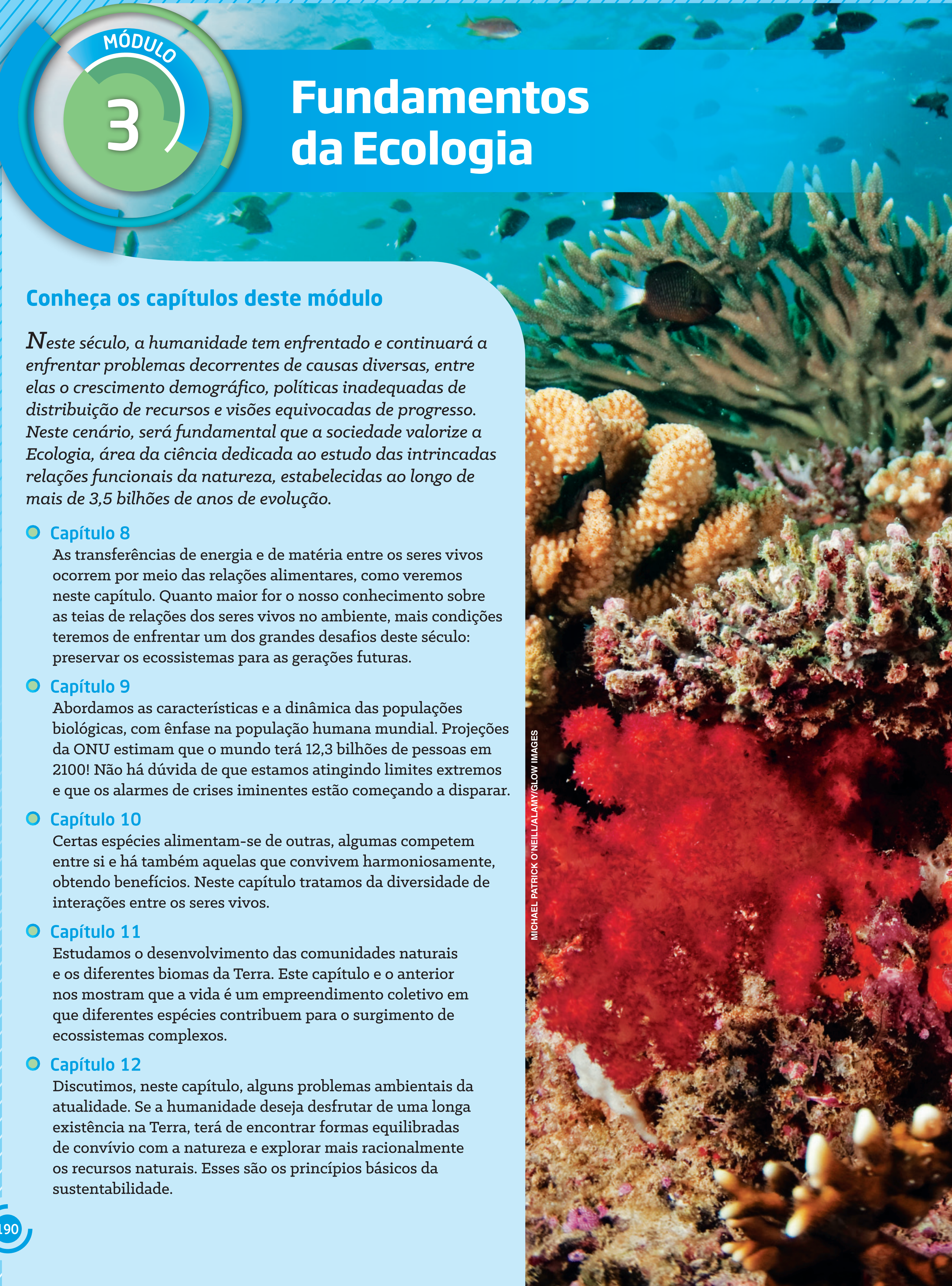
c) 85 milhões de anos.

d) 40 milhões de anos.

e) 65 milhões de anos.

MÓDULO 3

Fundamentos da Ecologia


MICHAEL PATRICK O'NEILL/ALAMY/GLOW IMAGES

Conheça os capítulos deste módulo

Neste século, a humanidade tem enfrentado e continuará a enfrentar problemas decorrentes de causas diversas, entre elas o crescimento demográfico, políticas inadequadas de distribuição de recursos e visões equivocadas de progresso. Neste cenário, será fundamental que a sociedade valorize a Ecologia, área da ciência dedicada ao estudo das intrincadas relações funcionais da natureza, estabelecidas ao longo de mais de 3,5 bilhões de anos de evolução.

Capítulo 8

As transferências de energia e de matéria entre os seres vivos ocorrem por meio das relações alimentares, como veremos neste capítulo. Quanto maior for o nosso conhecimento sobre as teias de relações dos seres vivos no ambiente, mais condições teremos de enfrentar um dos grandes desafios deste século: preservar os ecossistemas para as gerações futuras.

Capítulo 9

Abordamos as características e a dinâmica das populações biológicas, com ênfase na população humana mundial. Projeções da ONU estimam que o mundo terá 12,3 bilhões de pessoas em 2100! Não há dúvida de que estamos atingindo limites extremos e que os alarmes de crises iminentes estão começando a disparar.

Capítulo 10

Certas espécies alimentam-se de outras, algumas competem entre si e há também aquelas que convivem harmoniosamente, obtendo benefícios. Neste capítulo tratamos da diversidade de interações entre os seres vivos.

Capítulo 11

Estudamos o desenvolvimento das comunidades naturais e os diferentes biomas da Terra. Este capítulo e o anterior nos mostram que a vida é um empreendimento coletivo em que diferentes espécies contribuem para o surgimento de ecossistemas complexos.

Capítulo 12

Discutimos, neste capítulo, alguns problemas ambientais da atualidade. Se a humanidade deseja desfrutar de uma longa existência na Terra, terá de encontrar formas equilibradas de convívio com a natureza e explorar mais racionalmente os recursos naturais. Esses são os princípios básicos da sustentabilidade.

Capítulo 8

MURAT ONER TAS/ANADOLU AGENCY/GETTY IMAGES

O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza

Itens principais:

- Energia para a vida
- Transferências de energia entre seres vivos
- O conceito de ciclo biogeoquímico
- Ciclo da água
- Ciclo do carbono
- Ciclo do nitrogênio

Capítulo 9

HUNG CHUNG CHIH/SHUTTERSTOCK

A dinâmica das populações

Itens principais:

- O que é uma espécie biológica?
- Características das populações
- Fatores que regulam o tamanho populacional

Capítulo 10

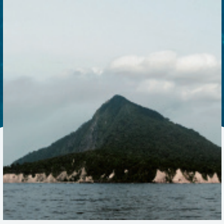
PATRICK ENDRES/DESIGN PICS/GETTY IMAGES

Relações ecológicas

Itens principais:

- Hábitat e nicho ecológico
- Relações ecológicas intraespecíficas
- Relações ecológicas interespecíficas

Capítulo 11



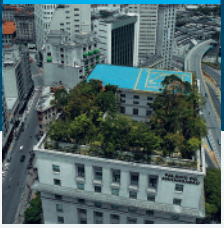
TERRY ALLEN/ALAMY/GLOW IMAGES

Sucessão ecológica e biomas

Itens principais:

- Sucessão ecológica
- Grandes biomas do mundo
- Domínios morfoclimáticos e biomas do Brasil
- Ecossistemas aquáticos

Capítulo 12

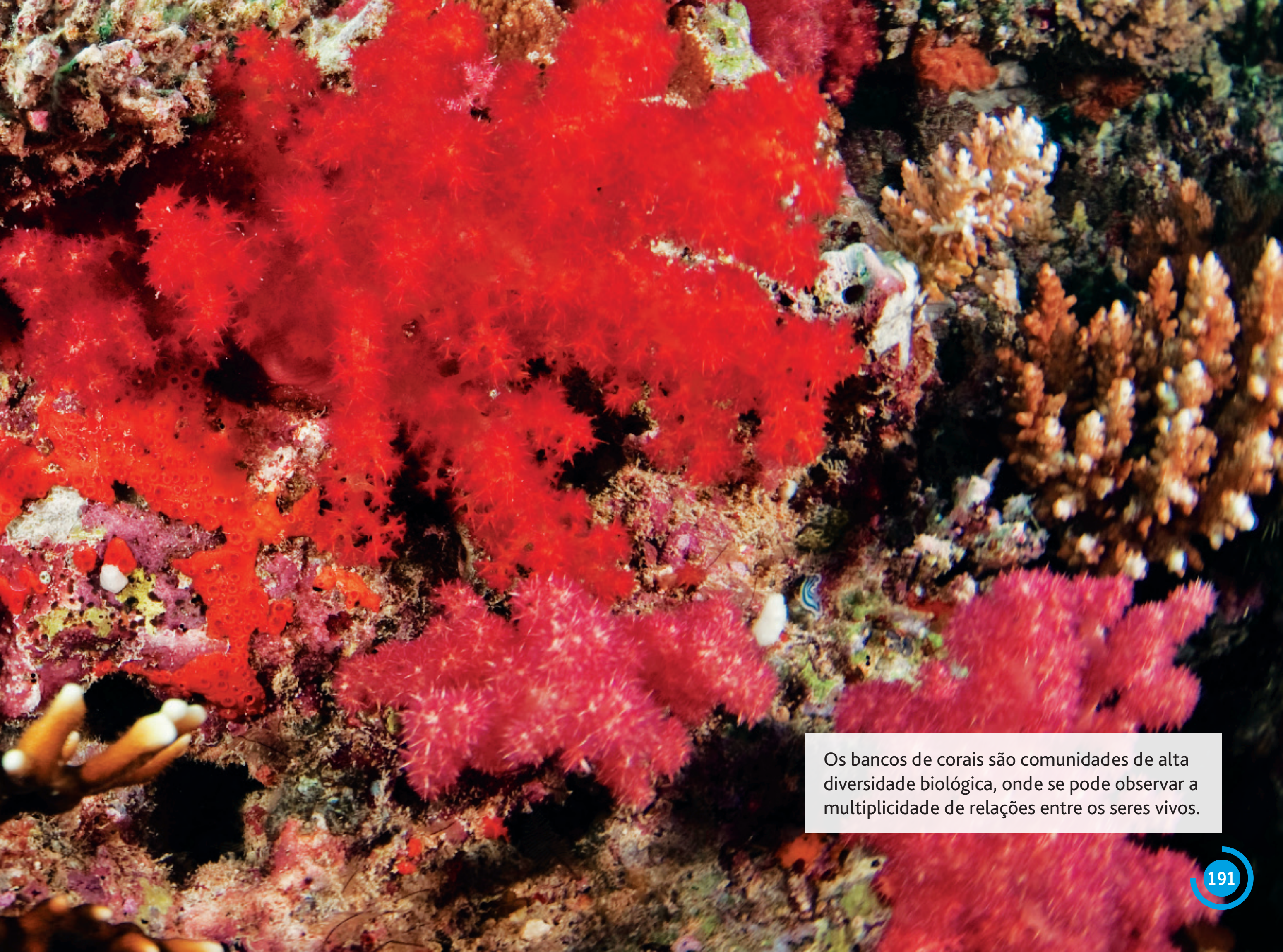


JOÃO WAINER/FOLHAPRESS

A humanidade e o ambiente

Itens principais:

- O conceito de desenvolvimento sustentável
- Poluição e desequilíbrios ambientais
- Alternativas para o futuro



Os bancos de corais são comunidades de alta diversidade biológica, onde se pode observar a multiplicidade de relações entre os seres vivos.

Capítulo 8

O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza

MURAT ONER TAS/ANADOLU AGENCY/GETTY IMAGES

O Sol é a principal fonte de energia para a vida na Terra. Além do calor, que faz as temperaturas terrestres serem confortáveis para os seres vivos, a energia da luz solar captada pelas plantas movimenta praticamente todos os seres vivos. Não é exagero dizer que é a energia do Sol que está "iluminando" seu pensamento neste momento. (Turquia, 2015.)

Pode-se dizer que vivemos de luz?

É verdade! Vivemos de luz. Não é à toa que muitas civilizações antigas viam o Sol como um deus. Os assírios personificavam o nosso conhecido astro-rei como o deus Shamash e os egípcios o chamavam de Rá. Na visão mítica egípcia, Rá desfilava diariamente pelo céu em sua carruagem dourada e brilhante, espalhando a vida sobre a Terra e marcando o ciclo do dia e da noite.

O Sol é uma presença tão cotidiana em nossa vida que às vezes nem nos lembramos de sua importância: ele supre de energia quase a totalidade da biosfera terrestre. Sem a energia solar, a vida em nosso planeta, caso existisse, se restringiria a poucas espécies de bactérias quimiolitoautotróficas, capazes de literalmente tirar energia "das pedras".

Se você é daqueles que só pensa no Sol na hora de se bronzear, saiba que é o astro-rei que fornece energia, entre outras coisas, para levá-lo à praia. Se você vai de ônibus ou de carro, pode estar utilizando a energia de derivados do petróleo, combustível fóssil que se formou a partir da matéria orgânica de seres vivos microscópicos que viveram há milhões de anos, nos mares da Terra primitiva. De onde esses seres obtinham energia para viver? Em última análise, por meio da fotossíntese, processo em que são produzidas moléculas orgânicas tendo como fonte de energia a luz solar.

E se eu utilizasse um veículo movido a etanol?, perguntaria alguém. A resposta seria a mesma. O etanol é formado por moléculas orgânicas provenientes da fermentação de açúcares, que as plantas produzem por meio da fotossíntese. De novo, a luz solar!

E se eu fosse a pé?, questionaria outro. A energia metabólica para andar e para tudo o que fazemos vem do que comemos. Vegetais como a alface de sua salada obtêm energia diretamente do Sol pela fotossíntese; a carne tem moléculas ricas em energia provenientes de animais que se alimentaram de plantas: sua energia, portanto, veio indiretamente do Sol.

Vivemos de luz, sim, mas indiretamente. Não acredite se alguém disser que parou de se alimentar e passou a viver diretamente de luz solar; a ciência contesta essa ideia. É melhor deixar isso com os especialistas: os seres fotossintetizantes.

A importância do assunto

Tomar consciência de que nossa vida depende da energia do Sol nos une ao cosmo, contribuindo para uma visão mais integrada da natureza.

O estudo das transferências de energia e de matéria nos ecossistemas tem revelado detalhes sobre a teia da vida na Terra. Quanto maior o nosso conhecimento da rede de relações entre os seres vivos e o ambiente, mais condições teremos de preservar os ecossistemas do nosso planeta, um dos grandes desafios do século XXI.

Neste capítulo discutimos como a energia da luz solar é captada pelos seres fotossintetizantes e transferida para o sistema vivo, quando os organismos se alimentam uns dos outros. Do ponto de vista da energética alimentar na natureza, há os que produzem e os que consomem. E é por meio dessas relações alimentares que a energia flui no sistema vivo.

Um dos grandes objetivos do capítulo é esclarecer por que a energia flui unidirecionalmente na parte viva da natureza, dissipando-se pouco a pouco na forma de calor. Além disso, discute-se o que isso tem a ver com as representações gráficas denominadas pirâmides ecológicas.

Outros aspectos importantes tratados no capítulo são os ciclos biogeoquímicos de alguns elementos fundamentais à vida. Diferentemente do fluxo unidirecional da energia, que se dissipa ao longo dos níveis tróficos, os elementos químicos são continuamente reciclados na natureza. Neste capítulo, acompanhe e compare o comportamento da energia e da matéria nos ecossistemas.

8.1 Energia para a vida

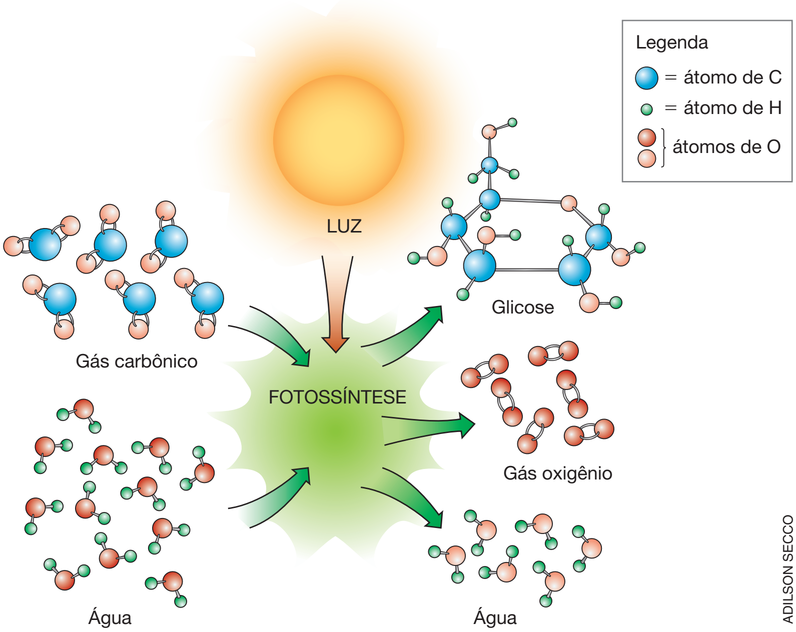
O Sol é uma estrela amarela localizada no centro do Sistema Solar. Cerca de 74% da massa solar deve-se ao gás hidrogênio (H_2) e 24% ao gás hélio (He); os 2% restantes distribuem-se entre elementos como o oxigênio, o carbono, o ferro, o enxofre, o níquel, entre outros.

A energia emitida pelo Sol, principalmente nas formas de luz e calor, é proveniente de reações de fusão nuclear, em que núcleos de hidrogênio se fundem, transformando-se em hélio. É essa energia que possibilita a existência de vida na Terra: certos componentes da radiação solar aquecem o solo, as massas de água e o ar, propiciando um ambiente favorável à vida, e certos componentes da radiação solar são captados pelos seres fotossintetizantes para sintetizar moléculas orgânicas. (Fig. 8.1)

Os glicídios produzidos na fotossíntese são utilizados pelo próprio organismo fotossintetizante de duas maneiras: a) para obter a energia necessária ao metabolismo; b) como matéria-prima para a síntese dos diversos tipos de moléculas que constituem seu corpo.

Os animais herbívoros, ao se alimentarem de seres fotossintetizantes como as plantas, ingerem moléculas orgânicas ricas em energia que foi originalmente captada da luz solar pelos seres fotossintetizantes.

Concluímos, então, que a porta de entrada para a energia solar nos sistemas vivos é a fotossíntese. A absoluta maioria dos organismos da Terra obtém energia para sua vida, direta ou indiretamente, do Sol.



ADILSON SECCO

Figura 8.1 Representação esquemática, por meio de modelos de esferas, do processo da fotossíntese. Os átomos de oxigênio das moléculas de água à esquerda foram coloridos em um tom vermelho mais escuro para mostrar que são eles que formam todo o gás oxigênio gerado no processo. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

8.2 Transferências de energia entre seres vivos

Um aspecto importante que deve ser tratado são os gastos energéticos nas transferências alimentares e o conceito de produtividade. Embora pareçam apenas conceitos teóricos, eles estão presentes no nosso dia a dia. Um exemplo disso é que o preço dos alimentos é influenciado por essas relações. Explore esse ponto de vista ao tratar o assunto.

A massa da matéria orgânica que constitui um ser vivo é chamada de **biomassa**. Uma vez que as moléculas orgânicas são altamente energéticas, a quantidade de biomassa reflete a quantidade de energia química potencial presente em determinada porção de matéria orgânica.

Como já comentamos, a energia entra na biosfera por meio dos seres autotróficos: algas, plantas e bactérias autotróficas. A maioria dos seres autotróficos é fotossintetizante, produzindo moléculas orgânicas a partir de compostos inorgânicos (H_2O e CO_2) e energia luminosa do Sol. Os seres autotróficos são os únicos capazes de produzir moléculas orgânicas, isto é, biomassa, a partir de moléculas inorgânicas; por isso, eles são os únicos “produtores” de biomassa na natureza.

Os seres heterotróficos (bactérias heterotróficas, fungos, protozoários, animais e umas poucas plantas parasitas) têm de obter moléculas orgânicas prontas para, a partir delas, conseguir energia e produzir suas próprias moléculas orgânicas. Assim, eles têm necessariamente de consumir matéria orgânica de outros seres vivos. Por isso, quanto ao aspecto alimentar, os seres heterotróficos desempenham o papel de “consumidores” de biomassa na natureza.

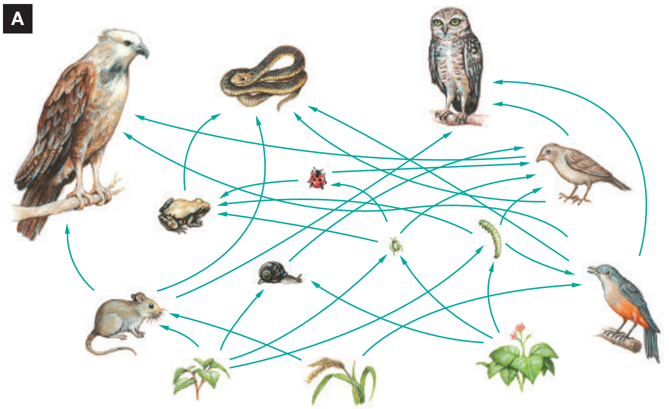
Teias e cadeias alimentares

Em uma comunidade biológica, os seres vivos mantêm diversos tipos de relações quanto à alimentação. Por exemplo, certos tipos de plantas servem de alimento a várias espécies de animais. Determinado tipo de pássaro alimenta-se de diversos animais, como insetos, vermes, aranhas etc. Outro pássaro só come sementes de capim e assim por diante. Essa multiplicidade de relações alimentares constitui a **teia alimentar**, ou **teia trófica** (do grego *trophé*, alimentar, nutrir).

Para facilitar o entendimento, costuma-se destacar, nas teias alimentares, determinadas sequências lineares de organismos, denominadas **cadeias alimentares**, ou **cadeias tróficas**. Vejamos um exemplo de cadeia alimentar: plantas de capim, gafanhotos que se alimentam do capim, pássaros que se alimentam dos gafanhotos e serpentes que se alimentam dos pássaros.

Os primeiros componentes da cadeia alimentar são os **produtores**, seres autotróficos fotossintetizantes ou quimiossintetizantes que produzem, a partir de substâncias inorgânicas, a biomassa que alimenta os demais componentes da cadeia.

Seres heterotróficos, ou seja, aqueles que se alimentam de outros seres vivos, são os **consumidores**. Os que se alimentam diretamente dos produtores são denominados **consumidores primários**; os que se alimentam dos consumidores primários são denominados **consumidores secundários**; e assim por diante. (Fig. 8.2)



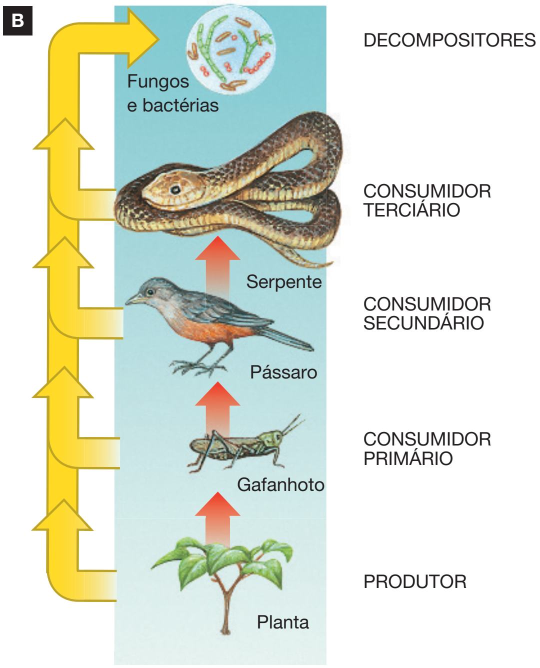


Figura 8.2 A. Representação esquemática de uma teia alimentar em um ecossistema hipotético. Os decompositores não foram representados. **B.** Representação de uma cadeia alimentar; as setas amarelas indicam que os decompositores atuam em todos os níveis tróficos e as setas vermelhas indicam a transferência de energia. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Na cadeia alimentar de nosso exemplo, distinguimos quatro níveis tróficos: o primeiro — dos produtores — é representado pelas plantas; o segundo — dos consumidores primários — é representado pelos gafanhotos; o terceiro — dos consumidores secundários — corresponde aos pássaros insetívoros; o quarto — dos consumidores terciários — é representado pelas serpentes.

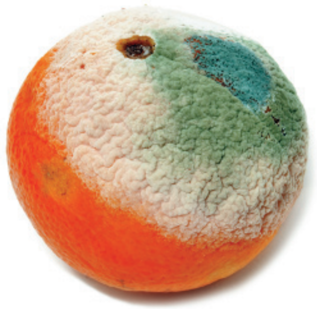
Em uma comunidade biológica, o mesmo organismo pode ocupar mais de um nível trófico. Por exemplo, um animal com alimentação variada, constituída por plantas e por animais, desempenha simultaneamente o papel de consumidor primário e de consumidor secundário ou terciário. Organismos com alimentação desse tipo são chamados **onívoros** (do latim *omnis*, tudo, e *vorare*, comer, devorar). Diversas espécies de animais são onívoras, inclusive a nossa.

Após a morte, a biomassa dos produtores e dos diversos níveis de consumidores serve de alimento para certos fungos e bactérias, que obtêm nutrientes e energia por meio da decomposição da matéria de cadáveres e de resíduos orgânicos, como fezes e excreções; por isso, eles são chamados de **decompositores**. (Fig. 8.3)

A decomposição é extremamente importante na natureza porque permite a reciclagem dos átomos dos diversos elementos químicos que compõem as moléculas orgânicas. Por meio desse processo, os átomos tornam-se novamente disponíveis no ambiente e podem voltar a fazer parte de outros seres vivos. A reciclagem de elementos químicos será estudada no último item deste capítulo.

Em ambientes aquáticos, os produtores são principalmente seres microscópicos, como bactérias autotróficas e algas que flutuam próximo à superfície, constituindo o **fitoplâncton** (do grego *phyton*, planta, e *plankton*, errante), ou plâncton **fotossintetizante**.

Os consumidores primários são principalmente protozoários, pequenos crustáceos, vermes, moluscos e larvas de diversas espécies, constituindo o **zooplâncton** (do grego *zoon*, animal), ou **plâncton não fotossintetizante**. Os consumidores secundários e terciários são principalmente peixes. (Fig. 8.4)



NITO/SHUTTERSTOCK

Figura 8.3 Imagem de um fruto em processo de decomposição. A ação dos decompositores, responsável pela deterioração dos alimentos, por exemplo, permite o retorno dos componentes dos seres vivos ao ambiente não vivo.

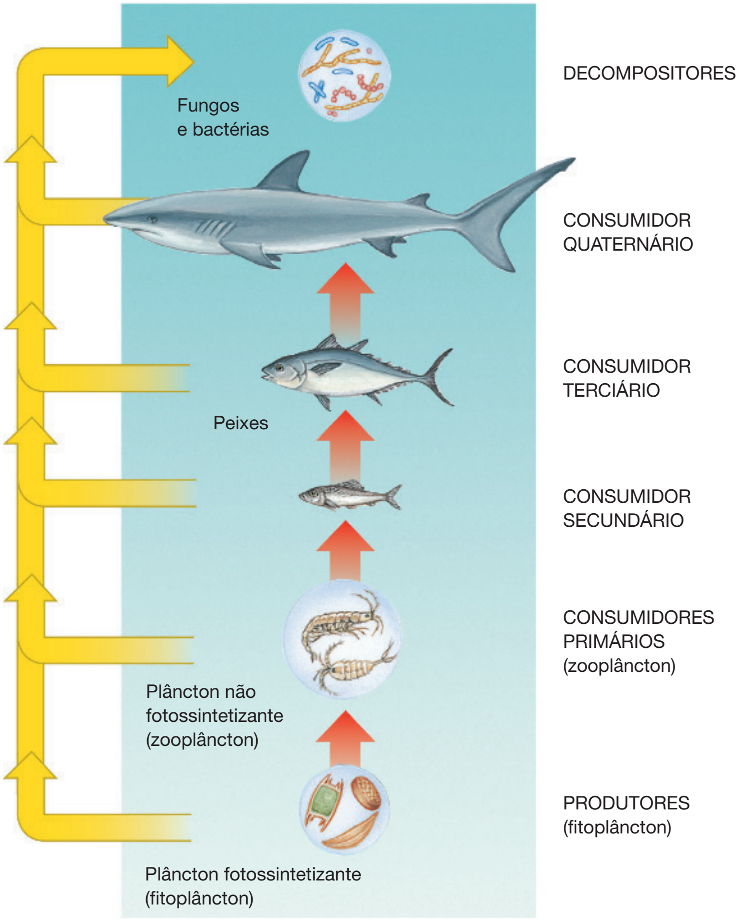

Fungos e bactérias
DECOMPOSITORES
CONSUMIDOR QUATERNÁRIO
CONSUMIDOR TERCIÁRIO
Peixes
CONSUMIDOR SECUNDÁRIO
CONSUMIDORES PRIMÁRIOS (zooplâncton)
Plâncton não fotossintetizante (zooplâncton)
PRODUTORES (fitoplâncton)
Plâncton fotossintetizante (fitoplâncton)

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 8.4 Representação esquemática de uma cadeia alimentar marinha. Nos ecossistemas marinhos, os produtores são representados principalmente pelo fitoplâncton. Há peixes em diferentes níveis tróficos, dependendo de seu tipo de alimentação. As setas amarelas representam a atuação dos decompositores em todos os níveis tróficos da cadeia e as setas vermelhas indicam a transferência de energia. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Dissipação de energia na teia alimentar

Imagine um coelho. O animal se alimenta diariamente de muitas (e muitas!) plantas. Ele utiliza a biomassa dos vegetais como fonte de energia e de matéria-prima para produzir sua biomassa e crescer. (Fig. 8.5)

DUNCAN USHER/ALAMY/LATINSTOCK

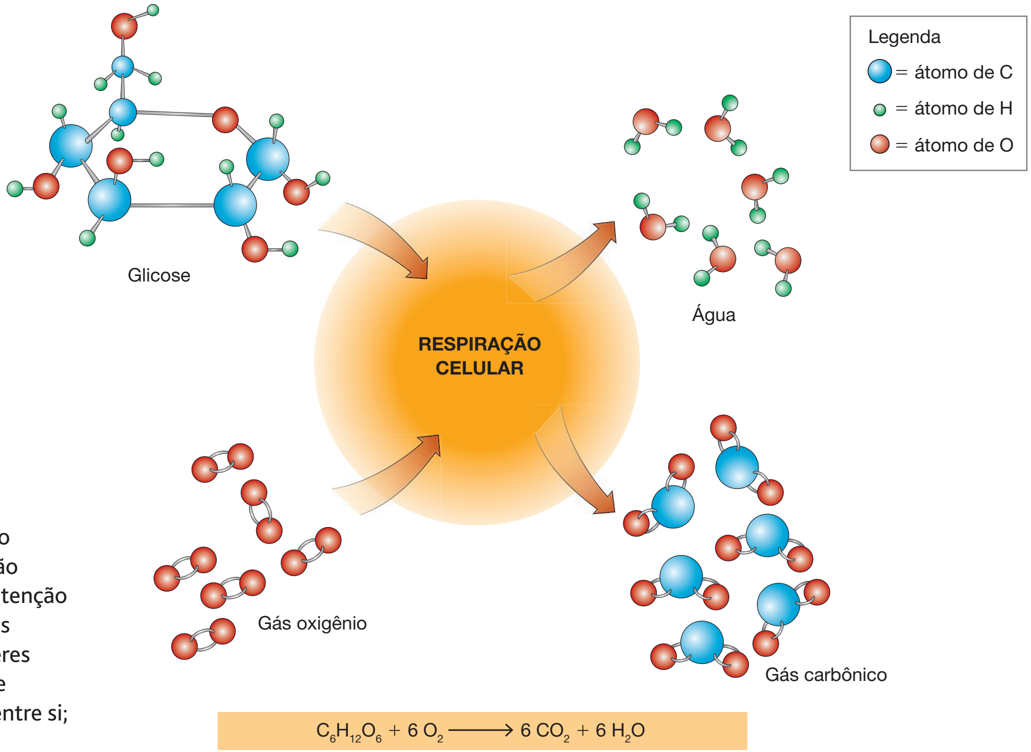
Figura 8.5 Coelhos da espécie *Oryctolagus cuniculus*, que podem chegar a 50 cm de comprimento. Esses mamíferos têm período de gestação de cerca de 30 dias e uma fêmea, que pode se reproduzir a partir de 6 meses de idade, tem de quatro a seis ninhadas anuais, em geral com quatro a oito filhotes por ninhada.

Ao fazer as contas, concluímos que a biomassa vegetal que alimentou o coelho é muito maior que a biomassa que ele ganhou com o crescimento. Como explicar essa “perda”?

Em primeiro lugar, um animal como o coelho consome muita energia para manter sua atividade metabólica, que lhe permite saltar, correr, procurar alimento etc. Em toda essa atividade, energia vai sendo dissipada na forma de calor. A fonte de energia para o metabolismo do animal provém do processamento de moléculas orgânicas de alimento dentro de suas células, em um processo denominado **respiração celular**.

Na respiração celular, moléculas orgânicas com alta energia (principalmente glicídios e lipídios) reagem com gás oxigênio (O_2), produzindo gás carbônico (CO_2) e água (H_2O). Esse processo permite aos animais (e também aos vegetais) liberar a energia contida nas moléculas orgânicas e utilizá-la nas diversas atividades metabólicas vitais. Assim, apenas para manter suas atividades normais, o coelho dissipa boa parte da energia do alimento que ingere. (Fig. 8.6)

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.



$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \longrightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Figura 8.6 Representação esquemática da respiração aeróbica, processo de obtenção de energia que ocorre nas células da maioria dos seres vivos. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Além disso, o coelho produz diariamente certa quantidade de urina e de fezes. Estas últimas contêm parte do alimento que o animal ingeriu, mas que não foi aproveitada completamente.

Para ganhar biomassa e crescer, o coelho precisa comer mais do que gasta com suas atividades metabólicas básicas e do que elimina nas fezes; tem de haver sobra energética e de biomassa para o animal produzir a matéria orgânica constituinte dos músculos, dos ossos e de todos os demais tecidos e órgãos corporais.

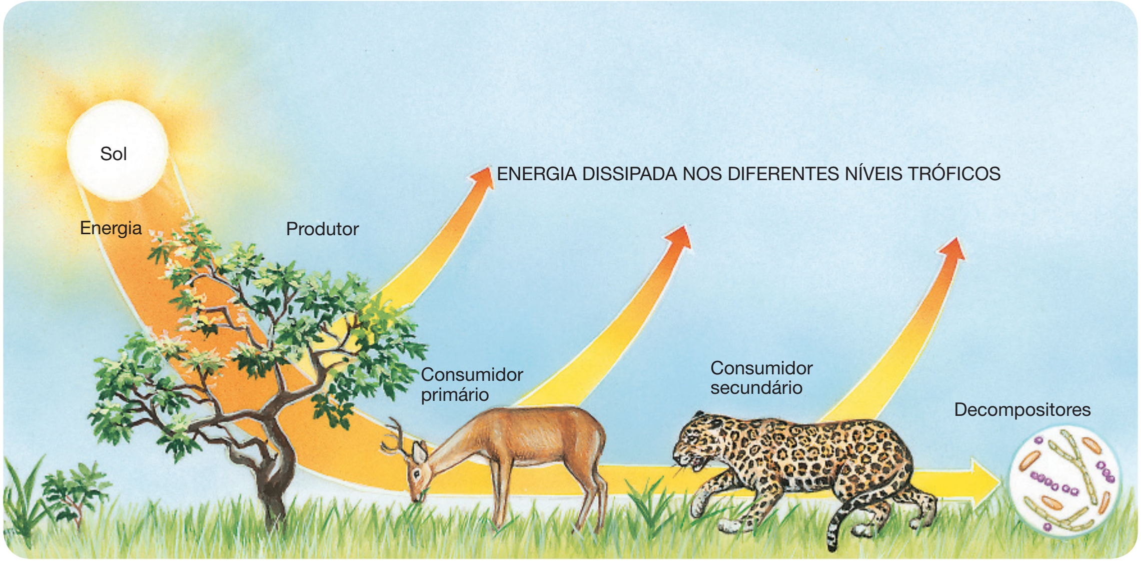
Nas cadeias alimentares, a quantidade de energia presente no nível trófico dos produtores, representado pelos vegetais ingeridos pelo coelho, é muito maior que a energia efetivamente transferida ao nível seguinte, no caso, ao coelho, o consumidor primário.

Como comentamos, isso ocorre por dois motivos: primeiro, porque os seres vivos consomem boa parte das moléculas nutritivas na respiração celular para manter sua própria vida; segundo, porque os seres vivos não aproveitam totalmente o alimento que ingerem: parte da biomassa ingerida é eliminada, inaproveitada, nas fezes.

Pirâmides ecológicas

A porcentagem de energia efetivamente transferida de um nível trófico ao nível seguinte varia de acordo com os tipos de organismos envolvidos na cadeia trófica, situando-se entre 5% e 20%. Isso quer dizer que entre 80% e 95% da energia potencialmente presente em um nível trófico não é transferida para o nível seguinte. No exemplo do coelho, que se alimenta de vegetais, a eficiência situa-se perto do limite inferior, uma vez que os alimentos vegetais contêm grande quantidade de fibras; estas, apesar de conter energia em potencial, são inaproveitadas e eliminadas nas fezes. (Fig. 8.7)

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.



JURANDIR RIBEIRO

Figura 8.7 Representação esquemática da transferência de energia ao longo de uma cadeia alimentar. A energia é gradualmente dissipada ao passar pelos níveis tróficos, em um processo unidirecional. Os decompositores atuam em todos os níveis tróficos. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Em uma teia alimentar, a quantidade de energia (em kcal = quilocaloria) ou seu equivalente em biomassa (em g = grama), nos diferentes níveis tróficos, costuma ser representada por retângulos horizontais sobrepostos, resultando em um gráfico denominado **pirâmide ecológica**, ou **pirâmide trófica.** (Fig. 8.8)

ADILSON SECCO

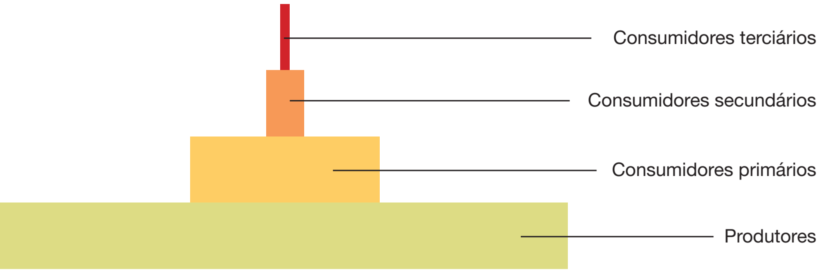


Figura 8.8 Exemplo de pirâmide ecológica. Gráficos em forma de pirâmide são utilizados para representar a energia e a biomassa disponíveis em cada nível trófico.

Pirâmides de biomassa e de energia

Nas pirâmides ecológicas, a base corresponde ao nível trófico dos produtores; em sequência, são representados os níveis dos consumidores primários, dos consumidores secundários e assim por diante. A largura relativa de cada nível, no diagrama, representa a quantidade de energia ou de biomassa presente.

As **pirâmides de biomassa** representam a massa de matéria orgânica, por área ou volume, disponível em cada nível trófico de uma comunidade biológica. A unidade geralmente utilizada nas pirâmides de biomassa é g/m^2 (grama por metro quadrado).

Em comunidades de terra firme, nas quais os produtores são geralmente plantas de ciclo relativamente longo, a pirâmide de biomassa assume o aspecto convencional, com base larga e ápice mais estreito. É o que acontece na cadeia alimentar representada na figura 8.8, em que a biomassa total das plantas (produtores) é maior que a dos gafanhotos (consumidores primários), que é maior que a dos pássaros (consumidores secundários), e assim por diante.

Nas comunidades aquáticas, entretanto, quando se quantifica a biomassa de cada nível trófico, chega-se a uma aparente contradição: a biomassa dos produtores, representados por bactérias autotróficas e algas unicelulares, é menor que a dos consumidores primários, representados pelo zooplâncton e por pequenos peixes. A base da pirâmide, portanto, é mais estreita que os retângulos correspondentes aos níveis tróficos superiores.

Essa aparente contradição é explicada pelo fato de que os produtores do fitoplâncton (algas e bactérias autotróficas) têm reprodução muito mais rápida e taxa de mortalidade mais alta que os consumidores primários (os constituintes do zooplâncton). Por isso, quando analisada em um dado momento, a biomassa do zooplâncton é geralmente maior que a do fitoplâncton. (Fig. 8.9)

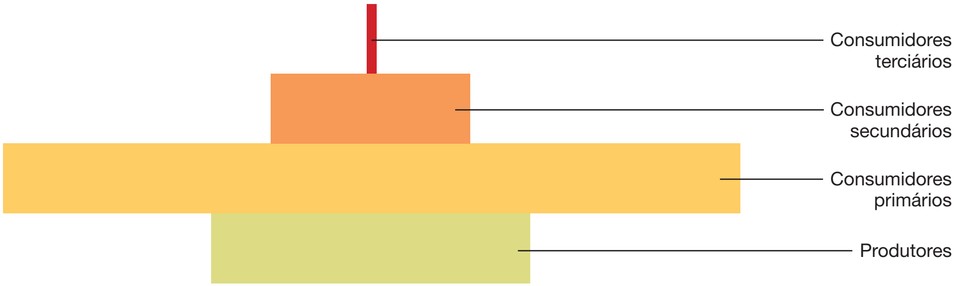


Figura 8.9 Pirâmides de biomassa como essa ocorrem geralmente em comunidades aquáticas: os produtores – fitoplâncton – retêm pouca biomassa, reciclando-a rapidamente.

As **pirâmides de energia** representam a energia presente em cada nível trófico, por área ou volume, em determinado intervalo de tempo. A unidade utilizada é geralmente kcal/m^2/ano (quilocaloria por metro quadrado por ano). O objetivo das pirâmides de energia é registrar com realismo a quantidade de energia nos níveis tróficos de uma comunidade ao longo do tempo. As pirâmides de energia sempre têm aspecto convencional, revelando o fluxo unidirecional de energia e sua progressiva dissipação ao longo das cadeias alimentares. (Fig. 8.10)

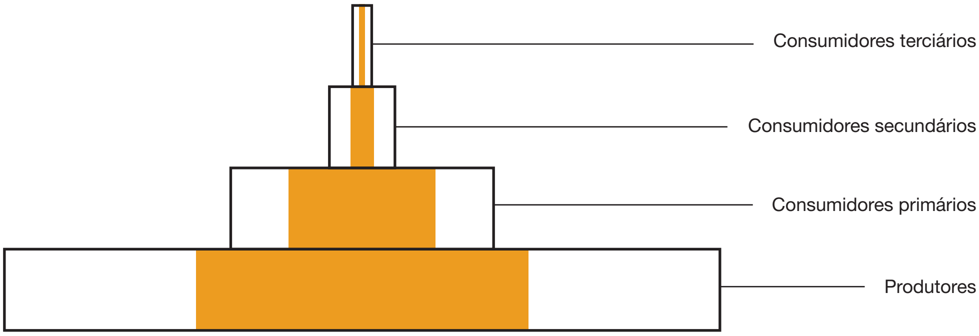


Figura 8.10 Pirâmide de energia hipotética que mostra a energia disponível (kcal/m^2/ano) em cada nível trófico (largura das barras) e a energia transferida para o nível trófico seguinte (porção da barra indicada em laranja).

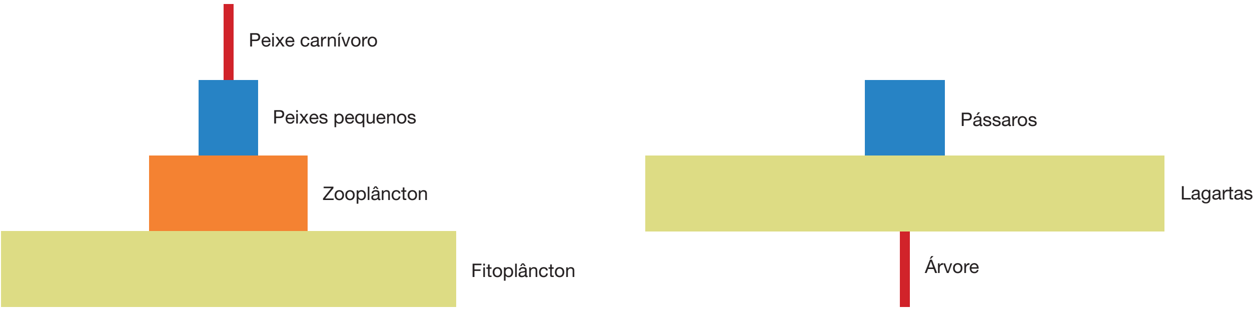
ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Pirâmides de números

Além das pirâmides de biomassa e de energia, também se costuma representar o número de indivíduos de cada nível trófico necessários para sustentar o nível seguinte. São as **pirâmides de números.**

Por exemplo, são necessárias 10.000 algas microscópicas do fitoplâncton – produtores – para alimentar 1.000 microcrustáceos do zooplâncton – consumidores primários –, que servem de alimento para 50 pequenos peixes – consumidores secundários –, que, por fim, alimentam um grande peixe carnívoro.

As pirâmides de números podem assumir forma invertida quando o produtor é uma grande árvore, por exemplo, cujas folhas são devoradas por 300 lagartas de borboleta, as quais fornecem alimento a 20 pássaros. (Fig. 8.11)



ADILSON SECCO

Figura 8.11 Exemplos de pirâmides de números: à esquerda, em um ecossistema aquático; à direita, em uma árvore.

O conceito de produtividade

A capacidade dos organismos de um nível trófico de aproveitar a energia recebida para produzir biomassa denomina-se **produtividade**. Esta é geralmente expressa em quilocaloria de biomassa produzida por m^2 por ano (kcal/m^2/ano).

No nível dos produtores, fala-se em **produtividade primária bruta (PPB)** como a quantidade de matéria orgânica que um organismo autotrófico consegue produzir na fotossíntese, por unidade de tempo.

Como já comentamos, parte da matéria orgânica sintetizada pelo organismo autotrófico é consumida por ele mesmo na respiração celular para suprir suas necessidades energéticas básicas de sobrevivência. Apenas o que sobra pode ser efetivamente armazenado em forma de biomassa.

Quando se descontam da produtividade primária bruta os gastos com a respiração (R), obtém-se a **produtividade primária líquida** (PPB − R = PPL). A energia correspondente à PPL é a que está realmente disponível para o nível trófico seguinte.

No nível dos consumidores, fala-se em **produtividade secundária bruta (PSB)** como a quantidade total de biomassa que um herbívoro efetivamente consegue absorver dos alimentos que ingere, pois um animal elimina, nas fezes, muito material orgânico potencialmente energético, porém não aproveitável por ele.

Quando se descontam da produtividade secundária bruta os gastos com a respiração (R), obtém-se a **produtividade secundária líquida** (PSB − R = PSL). A PSL corresponde ao que o herbívoro acumula efetivamente de biomassa em determinado intervalo de tempo; essa energia é a que está realmente disponível para o nível trófico seguinte.

Quanto menos níveis tróficos uma cadeia alimentar tem, menor é a dissipação energética que ocorre nela, uma vez que as maiores perdas de energia ocorrem quando a matéria orgânica é transferida de um nível trófico para outro. Por essa razão, é menos dispendioso, embora nem sempre agradável ao paladar humano, consumir diretamente vegetais como alimento, evitando a perda energética que acontece na transferência para o nível trófico dos herbívoros.

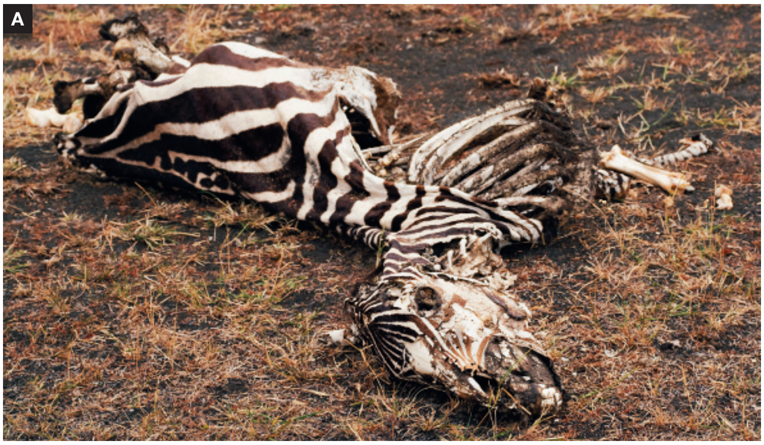
8.3 O conceito de ciclo biogeoquímico

As moléculas e os átomos dos diversos elementos químicos que constituem os corpos dos seres vivos retornam ao ambiente após a morte. Isso ocorre principalmente graças à atividade de seres comedores de detritos (seres detritívoros) e de bactérias e fungos (agentes decompositores ou, simplesmente, decompositores).

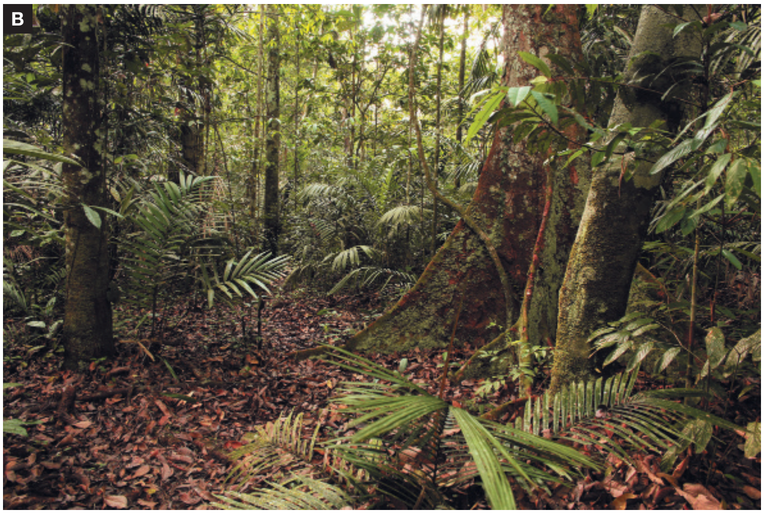
Os seres detritívoros, também chamados de saprófagos ou necrófagos, têm grande importância ecológica, pois alimentam-se de cadáveres e resíduos orgânicos, fragmentando-os e facilitando a ação dos agentes decompositores. Exemplos de animais detritívoros são minhocas, urubus e larvas de certos insetos, entre outros.

Ao se nutrir dos cadáveres, das fezes e de outros resíduos produzidos por seres vivos, os agentes decompositores promovem a degradação da matéria orgânica, transformando moléculas complexas em outras mais simples, em geral inorgânicas. Estas retornam à parte não viva do ambiente e podem ser reaproveitadas por outros organismos como matéria-prima para a construção de suas próprias moléculas orgânicas.

A circulação de elementos químicos constituintes de moléculas orgânicas entre os organismos e a parte não viva do planeta (atmosfera, hidrosfera e litosfera) é denominada **ciclo biogeoquímico** (do grego *bios*, vida, e *geo*, Terra). A constante reciclagem da matéria orgânica devolve ao ambiente, na forma de substâncias inorgânicas, os elementos químicos que a constituíam, possibilitando a utilização desses elementos por outros seres vivos. Por exemplo, a existência de uma floresta exuberante em solos pobres da região amazônica é possível graças à rápida decomposição de folhas, galhos, frutos e animais mortos, o que proporciona a devolução ao solo de quantidades significativas de elementos químicos essenciais à floresta, como nitrogênio, cálcio, enxofre, potássio, magnésio, sódio e fósforo, entre outros. (Fig. 8.12)



HENRIK OLUND/RADIU IMAGES/LATINSTOCK



FABIO COLOMBINI

Figura 8.12 A. Cadáver de um animal em processo de decomposição. Cadáveres são rapidamente degradados pela ação de seres detritívoros e decompositores. **B.** Fragmento de floresta densa em região tropical. A existência de florestas desse tipo é garantida por uma eficiente reciclagem de nutrientes, realizada por animais detritívoros, como minhocas e certos insetos, e por agentes decompositores. (Manaus, AM, 2014.)

8.4 Ciclo da água

A água (H_2O) é a única substância que, nas condições normais de nosso planeta, se apresenta nos três estados: líquido, cobrindo cerca de 3/4 da superfície terrestre; gasoso, na forma de vapor-d'água atmosférico; e sólido, na forma de gelo, nas regiões próximas aos polos e no topo das altas montanhas.

Pela evaporação, a água de oceanos, lagos, rios, geleiras e mesmo a embebida no solo passa à forma gasosa, acumulando-se na atmosfera. Nas grandes altitudes, o vapor-d'água condensa-se e volta à forma líquida, originando as nuvens e precipitando-se como chuvas sobre a superfície terrestre. Esse processo contínuo de evaporação e condensação, conhecido como **ciclo da água**, ou **ciclo hidrológico**, contribui decisivamente para tornar o ambiente da Terra favorável à existência de seres vivos.

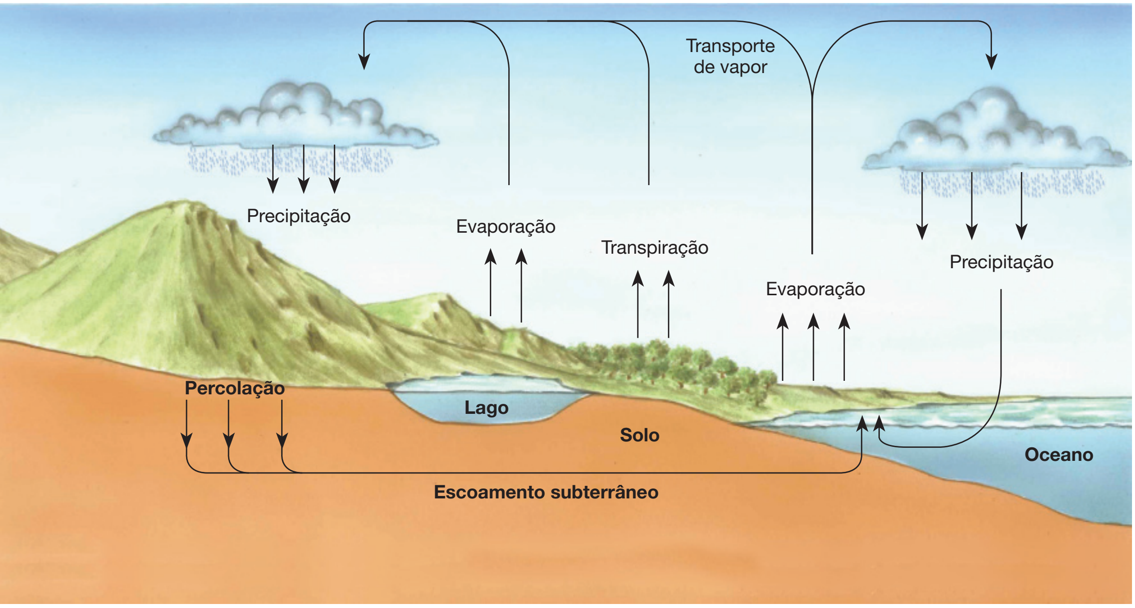
Parte do caminho da água na natureza passa pelos seres vivos, uma vez que a água é essencial à vida. As moléculas de água fazem parte do citoplasma das células e dos diversos fluidos corporais dos seres vivos (sangue, seiva, urina etc.). Nas células vivas, as moléculas de água participam de diversos processos vitais.

A maioria das plantas obtém água do ambiente pelas raízes. Os animais obtêm água ingerindo-a na forma líquida ou comendo alimentos ricos em água. A água presente em plantas e animais retorna continuamente ao ambiente por meio da transpiração, processo que consiste na transformação do suor presente na superfície corporal em vapor-d'água. Muitos animais também eliminam água na urina e nas fezes. Finalmente, com a morte dos organismos, a água que estava em seus corpos acaba sendo devolvida ao ambiente, processo que conta com a participação dos decompositores.

Como já comentamos, praticamente toda a matéria orgânica terrestre provém, originalmente, de moléculas produzidas na **fotossíntese**, processo metabólico cujos reagentes básicos são água e gás carbônico. Na fotossíntese, os átomos de hidrogênio das moléculas de água são utilizados para a produção de moléculas orgânicas, juntamente com átomos de carbono e de oxigênio do gás carbônico (CO_2). Os átomos de oxigênio da água utilizada na fotossíntese são eliminados para o ambiente na forma de gás oxigênio (O_2).

Parte da água absorvida ou mesmo produzida por um organismo é utilizada na síntese dos diversos tipos de moléculas orgânicas características de cada espécie.

Moléculas de água e de gás carbônico são produzidas durante a **respiração celular**. Nesse processo, moléculas orgânicas nutritivas são degradadas, na presença de gás oxigênio, para obtenção de energia metabólica. Note a multiplicidade de processos e as associações e reassociações de que a água participa na natureza. (Fig. 8.13)



JURANDIR RIBEIRO

Figura 8.13 O ciclo hidrológico envolve os movimentos da água em estado gasoso e líquido, na atmosfera, e em estado líquido (e eventualmente sólido) na superfície terrestre. Os seres vivos participam desse ciclo, uma vez que a água é fundamental à vida. Note que no esquema aparece o termo "percolação". Essa etapa se relaciona com a passagem da água do solo para o aquífero (reservatório subterrâneo). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Água: um recurso cada vez mais precioso

1 Além de conhecer as principais características da água e sua importância para a vida em nosso planeta, todo cidadão responsável também tem de estar informado sobre o valor da água como recurso natural.

2 Já há escassez de água potável em países da África e do Oriente Médio, e um relatório da Organização das Nações Unidas (ONU), divulgado no Fórum Mundial das Águas 2012, realizado em Marselha, França, de 12 a 17 de março de 2012, apresentava a sombria previsão de que, até 2050, cerca de 4 bilhões de pessoas viverão em condições de extrema falta de água. A essas más notícias soma-se a previsão da redução das chuvas como consequência da mudança climática global.

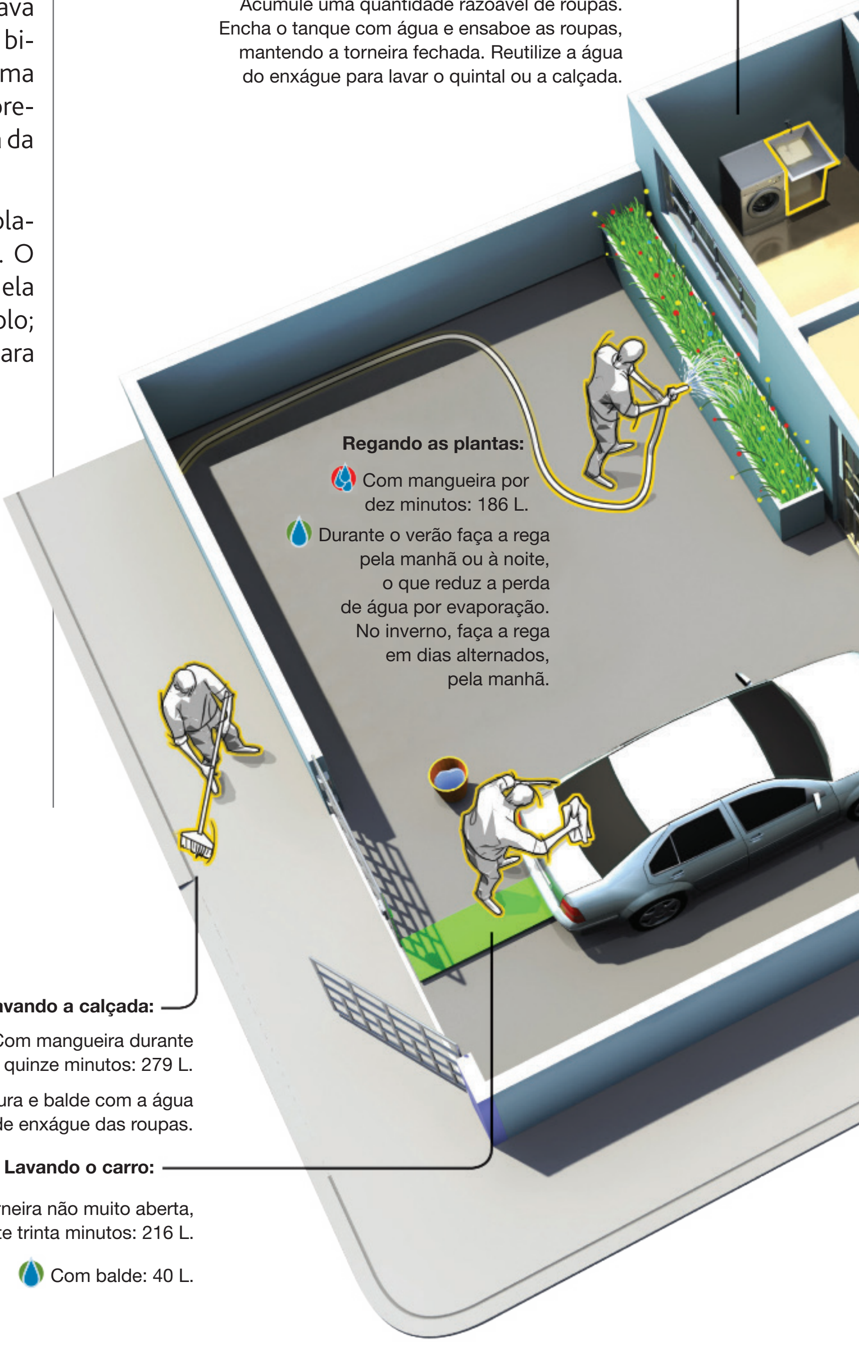
3 Cerca de 97,5% da água presente em nosso planeta é salgada, constituindo mares e oceanos. O restante, cerca de 2,5%, é de água doce; porém, ela se encontra quase toda congelada ou no subsolo; apenas aproximadamente 0,01% está acessível para o consumo humano.

4 O Brasil detém quase 14% da água potável disponível no mundo. Entretanto, esse recurso distribui-se desigualmente pelo país. Na Bacia Amazônica, por exemplo, concentram-se mais de 73% do volume de água doce brasileiro, servindo a apenas cerca de 7% da população. O restante, cerca de 27%, distribui-se de maneira desigual pelo território nacional. A região Nordeste, por exemplo, conta com cerca de 5% das reservas de água potável do país, embora nela vivam quase 28% da população brasileira.

A falta de água pode ser evitada?

5 Conhecer melhor o ciclo da água e racionalizar seu consumo são providências importantes para o futuro da humanidade e todos podem (e devem) participar dessa empreitada. Por isso, os governos precisam investir em estudos sobre os recursos hídricos e todos os cidadãos devem aprender a usar racionalmente a água potável. Ainda há muito desperdício desse recurso na agricultura, na indústria e no uso doméstico.

6 De acordo com a ONU, cada pessoa necessita de cerca de 110 L de água por dia para atender às necessidades de consumo e higiene. No entanto, no Brasil, o consumo por pessoa pode chegar a mais de 200 L/dia. Veja a seguir algumas maneiras de racionalizar o consumo de água no seu dia a dia.



Lavando roupa:

No tanque, com a torneira aberta por quinze minutos, o gasto de água pode chegar a 279 L. Acumule uma quantidade razoável de roupas. Encha o tanque com água e ensaboe as roupas, mantendo a torneira fechada. Reutilize a água do enxágue para lavar o quintal ou a calçada.

Regando as plantas:

Com mangueira por dez minutos: 186 L.

Durante o verão faça a rega pela manhã ou à noite, o que reduz a perda de água por evaporação. No inverno, faça a rega em dias alternados, pela manhã.

Lavando a calçada:

Com mangueira durante quinze minutos: 279 L.

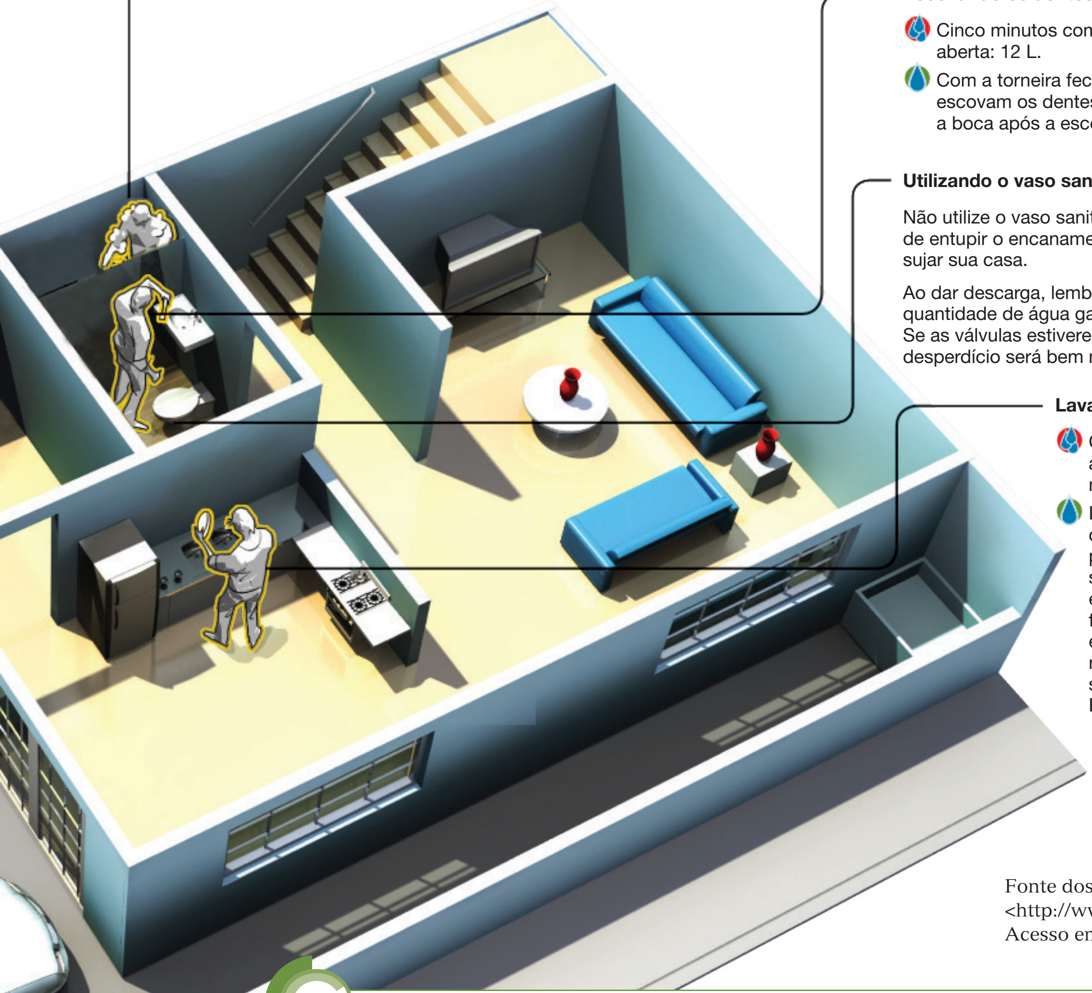
Use vassoura e balde com a água de enxágue das roupas.

Lavando o carro:

Com a torneira não muito aberta, durante trinta minutos: 216 L.

Com balde: 40 L.

🔴 Desperdício
🔵 Consumo consciente



Tomando banho:

🔴 Quinze minutos com o registro aberto na ducha: 135 L; no chuveiro elétrico: 45 L.

🔵 Feche o registro ao se ensaboar e reduza o tempo para 5 minutos; na ducha, o consumo cai para 45 L; no chuveiro elétrico, cai para 15 L.

Escovando os dentes:

🔴 Cinco minutos com a torneira não muito aberta: 12 L.

🔵 Com a torneira fechada enquanto se escovam os dentes e apenas enxaguando a boca após a escovação: 0,5 L.

Utilizando o vaso sanitário:

Não utilize o vaso sanitário como lixeira. Além de entupir o encanamento, o lixo pode voltar e sujar sua casa.

Ao dar descarga, lembre-se de que a quantidade de água gasta é muito grande. Se as válvulas estiverem defeituosas, o desperdício será bem maior.

Lavando a louça:

🔴 Com a torneira meio aberta por quinze minutos: 117 L.

🔵 Limpe os restos de comida dos pratos e panelas com esponja e sabão. Abra a torneira, enxágue rapidamente e feche-a. Ensaboe tudo e depois abra a torneira novamente para retirar o sabão ou detergente. Em quinze minutos: 20 L.

Fonte dos dados:
<http://www.sabesp.com.br>.
Acesso em: mar. 2016.

ILUSTRAÇÃO: NILSON CARDOSO

Guia de leitura

Responda em seu caderno

1. Leia os dois parágrafos iniciais do quadro. Embora seja assustador imaginar um mundo com água potável escassa, isso nos leva a refletir sobre o que podemos fazer para contribuir positivamente nessa questão de cidadania.
2. O terceiro parágrafo comenta sobre as reservas de água não potável. Seria possível dessalinizar água do mar? Ou utilizar gelo polar derretido para obter água potável? Quais seriam os pontos negativos dessas tecnologias? Considere esses temas para futuras pesquisas.
3. Leia o parágrafo de número 4 e exercite a decodificação de informações escritas, passando-as para uma linguagem visual, como um mapa do Brasil dividido em regiões e com dados estatísticos associados. Eventualmente, pesquise dados complementares de modo a compor um mapa com informações mais completas.
4. No quinto parágrafo, no item *A falta de água pode ser evitada?*, são mencionadas ações no interesse da cidadania para racionalizar o consumo de água, preservando-a para as futuras gerações humanas. As ilustrações e as respectivas legendas mostram atitudes cotidianas nesse sentido. Você acha que poderia contribuir com alguma atitude para racionalizar seu consumo de água e o de sua família?

8.5 Ciclo do carbono

Seria interessante pedir aos alunos que representem o ciclo do carbono inserindo a participação deles nesse ciclo. Além de ajudar a fixar os conteúdos, isso dá a eles oportunidade de desenvolverem formas de expressão e outras habilidades.

O carbono forma a estrutura básica de todas as moléculas orgânicas. Os átomos desse elemento químico circulam entre o ambiente e os seres vivos, o que constitui o **ciclo do carbono**.

Parte substancial das moléculas orgânicas produzidas na fotossíntese ou na quimiossíntese é degradada logo em seguida pelo próprio organismo autotrófico, para obtenção da energia necessária ao metabolismo. Nesses processos de degradação – principalmente a respiração celular e a fermentação –, o carbono que constituía as moléculas orgânicas degradadas é devolvido ao ambiente na forma de CO_2. O restante da matéria orgânica permanece integrado ao corpo do organismo autotrófico, constituindo sua biomassa.

O carbono da biomassa dos produtores pode seguir dois caminhos: a) ser restituído ao ambiente na forma de CO_2, quando o organismo autotrófico morre e sua matéria orgânica é degradada pelos decompositores; b) ser transferido para os animais herbívoros, quando eles se alimentam dos produtores.

Como vimos, boa parte da energia potencialmente presente nas substâncias orgânicas ingeridas pelo herbívoro não é aproveitada, sendo eliminada nas fezes. Estas sofrem a ação dos decompositores, que vivem da energia que restou na matéria orgânica eliminada.

Parte das moléculas orgânicas realmente incorporadas por um animal herbívoro é degradada na respiração celular, fornecendo energia para o metabolismo das células; o carbono dessas moléculas degradadas é liberado para o ambiente na forma de CO_2. O restante das moléculas orgânicas incorporadas pelo herbívoro é empregada na síntese de novas substâncias orgânicas, passando a constituir sua biomassa.

Ao se alimentar de um herbívoro, um animal carnívoro também é incapaz de aproveitar parte significativa do potencial energético do alimento, que é eliminada nas fezes. Assim como nos herbívoros, parte das moléculas orgânicas realmente incorporadas pelo carnívoro é degradada na respiração celular, fornecendo energia para as células. Na respiração, o carbono das moléculas degradadas é liberado na forma de CO_2. O restante das moléculas orgânicas incorporadas pelo carnívoro é transformado, sendo empregado na síntese de novas substâncias orgânicas e passa a integrar sua biomassa.

Portanto, o carbono originalmente captado pelos produtores na fotossíntese passa de um nível trófico para outro, ao mesmo tempo que retorna aos poucos à atmosfera durante os processos metabólicos dos organismos e pela ação dos decompositores, que atuam em todos os níveis tróficos. (Fig. 8.14)

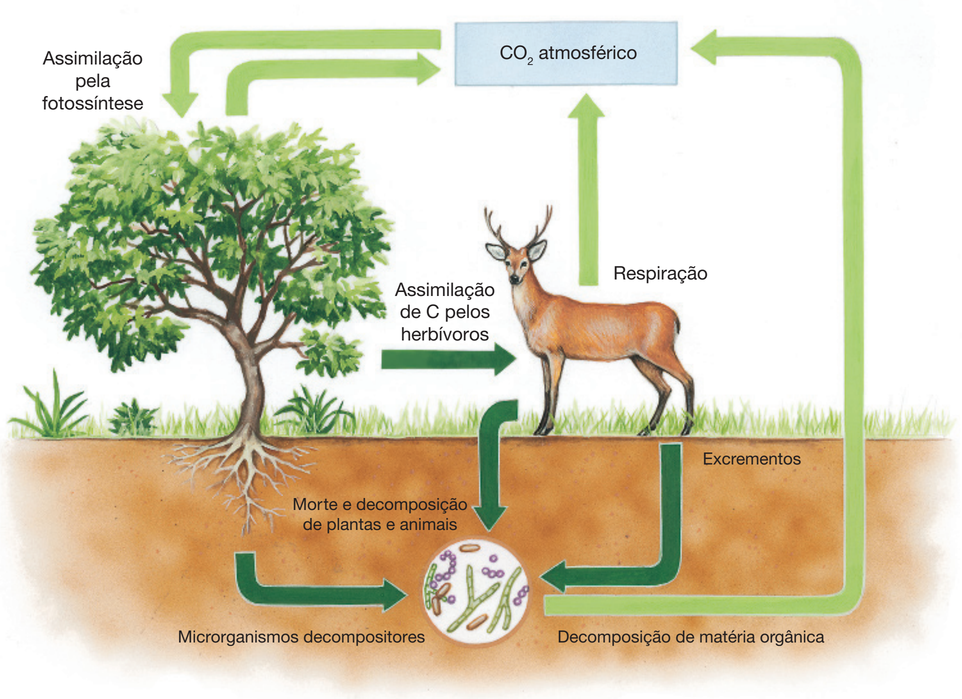

Assimilação pela fotossíntese
CO_2 atmosférico
Respiração
Assimilação de C pelos herbívoros
Excrementos
Morte e decomposição de plantas e animais
Microrganismos decompositores
Decomposição de matéria orgânica

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 8.14 O carbono é o constituinte de todas as moléculas orgânicas. Os átomos desse elemento químico ingressam nas comunidades biológicas por meio da fotossíntese ou da quimiossíntese. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

8.6 Ciclo do nitrogênio

O **ciclo do nitrogênio** consiste na circulação de átomos de nitrogênio entre os seres vivos e a parte não viva do ambiente. O nitrogênio faz parte de diversas moléculas orgânicas, entre elas as proteínas e os ácidos nucleicos.

O maior “reservatório” de nitrogênio do planeta é a atmosfera, onde esse elemento químico se encontra na forma de gás nitrogênio, ou nitrogênio molecular (N_2), perfazendo cerca de 79% do volume do ar. Apesar dessa quantidade disponível no ar, a maioria dos seres vivos não consegue utilizar diretamente N_2. Apenas algumas poucas espécies de bactérias, genericamente chamadas bactérias fixadoras de nitrogênio, são capazes de incorporar os átomos de nitrogênio do N_2 em suas moléculas orgânicas, fenômeno denominado **fixação do nitrogênio**.

A maioria das bactérias fixadoras de nitrogênio vive no solo. Quando morrem e se decompõem, elas têm suas moléculas nitrogenadas transformadas em **amônia** (NH_3). Algumas espécies de plantas conseguem aproveitar diretamente a amônia e utilizá-la como fonte de nitrogênio para seu metabolismo.

A amônia disponível no solo é amplamente aproveitada por um grupo de bactérias pertencentes ao gênero *Nitrosomonas*, capazes de utilizar amônia em seus processos de obtenção de energia. Em contrapartida, elas eliminam no solo compostos nitrogenados denominados **nitritos** (NO_2^-).

Os nitritos são, então, utilizados por outras bactérias presentes no solo, pertencentes ao gênero *Nitrobacter*, que eliminam compostos nitrogenados denominados **nitratos** (NO_3^-). Estes, por sua vez, são amplamente utilizados pelas plantas, constituindo sua principal fonte de nitrogênio.

O processo que abrange a transformação da amônia em nitritos e, depois, de nitritos em nitratos é denominado **nitrificação**. Por isso, nitrossomonas e nitrobactérias são genericamente chamadas de **bactérias nitrificantes**.

Com o nitrogênio que absorvem, as plantas produzem moléculas orgânicas constituintes de seu corpo, como as proteínas e os ácidos nucleicos. As moléculas nitrogenadas das plantas constituem a fonte de nitrogênio para os animais herbívoros que se alimentam delas. O mesmo processo ocorre nos níveis tróficos superiores ao longo da teia alimentar.

No metabolismo animal, proteínas e ácidos nucleicos sofrem constante degradação, com produção de diversos tipos de compostos nitrogenados genericamente denominados **excreções**, ou **excretas**, que são eliminados para o ambiente. Os principais produtos nitrogenados excretados pelos animais são a amônia, a ureia e o ácido úrico.

Com a ação dos decompositores sobre plantas e animais mortos e sobre as excreções e as fezes animais, o nitrogênio constituinte de moléculas orgânicas retorna ao solo na forma de amônia, que pode novamente passar por processos de nitrificação e originar nitratos.

Enquanto uma parte dos compostos nitrogenados presentes no solo sofre nitrificação, outra parte sofre **desnitrificação**, processo realizado por bactérias do solo genericamente denominadas **bactérias desnitrificantes**. Estas degradam compostos nitrogenados para obter energia, liberando gás nitrogênio (N_2) para a atmosfera. (Fig. 8.15)

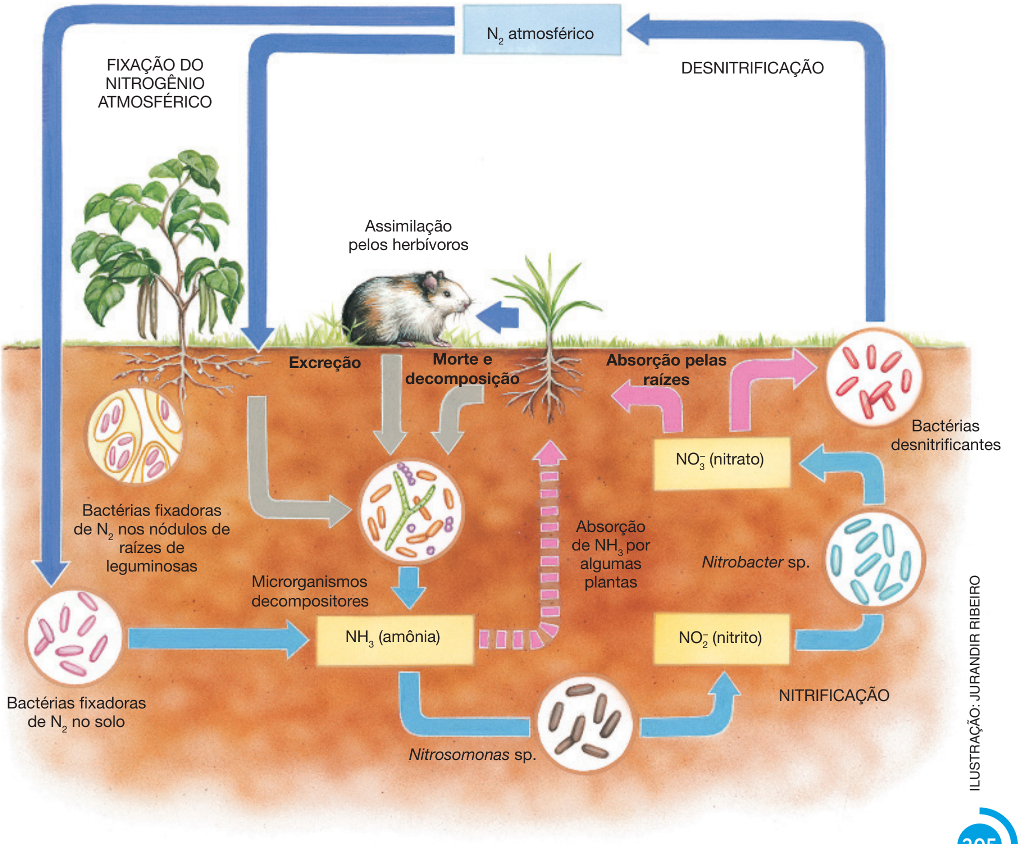

N₂ atmosférico
FIXAÇÃO DO NITROGÊNIO ATMOSFÉRICO
DESNITRIFICAÇÃO
Assimilação pelos herbívoros
Excreção
Morte e decomposição
Absorção pelas raízes
Bactérias desnitrificantes
NO₃⁻ (nitrato)
Bactérias fixadoras de N₂ nos nódulos de raízes de leguminosas
Absorção de NH₃ por algumas plantas
Nitrobacter sp.
Microrganismos decompositores
NH₃ (amônia)
NO₂⁻ (nitrito)
Bactérias fixadoras de N₂ no solo
NITRIFICAÇÃO
Nitrosomonas sp.

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 8.15 No ciclo do nitrogênio, bactérias de várias espécies desempenham papel fundamental, tanto na entrada do nitrogênio na parte viva do ambiente como em sua restituição à atmosfera. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Ciência e cidadania

Adubação verde, leguminosas e rizóbios

1 Às vezes, progredir pode ser simplesmente resgatar práticas antigas, esquecidas durante a caminhada rumo à modernidade. Isso tem ocorrido recentemente na agricultura, com a nova ênfase na adubação verde, técnica empregada por chineses, gregos e romanos há mais de 2 mil anos.

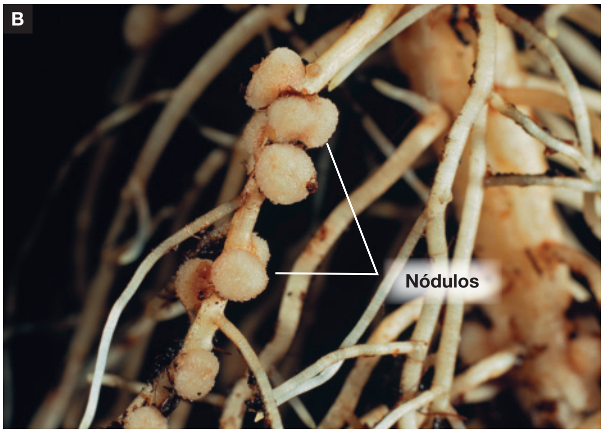
2 A adubação verde consiste em preparar campos de cultivo por meio do plantio de leguminosas (soja, alfafa, feijão, ervilha etc.), plantas que abrigam em suas raízes bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Rhizobium*. Após a decomposição dessa biomassa vegetal cultivada, os nutrientes tornam-se disponíveis no solo, fertilizando-o para o cultivo de espécies não leguminosas.

3 O plantio de leguminosas e não leguminosas em períodos alternados em um campo de cultivo costuma ser chamado de rotação de culturas. O cultivo de leguminosas juntamente com plantas não leguminosas no mesmo campo constitui as plantações consorciadas. No Brasil, é comum plantar feijão em fileiras alternadas com milho.

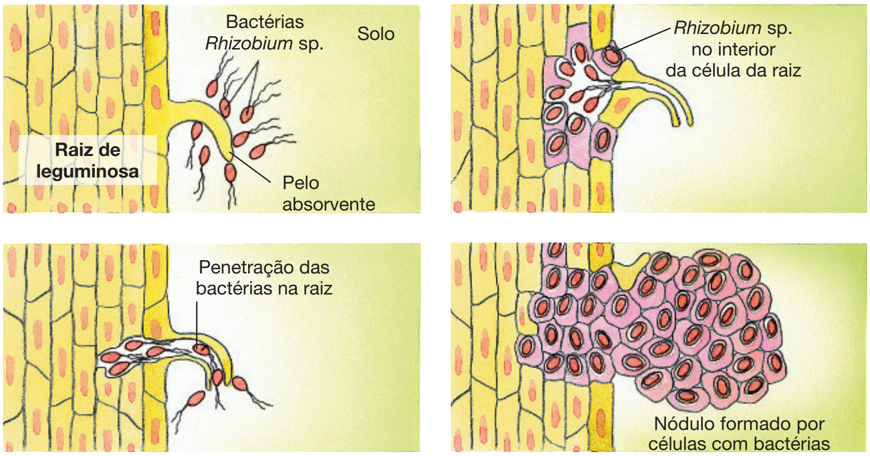
4 A adubação verde tem diversos benefícios, como o aumento da matéria orgânica no solo e a melhora da textura e da densidade da terra. Entretanto, o principal benefício da técnica é o aumento da quantidade de nitrogênio disponível para as plantas. Pesquisas indicam que, em campos experimentais plantados com alfafa e soja, a quantidade de nitrogênio fixado aumenta até 100 vezes em relação a um ecossistema natural.

5 Entre as muitas bactérias que vivem no solo estão as do gênero *Rhizobium* – o rizóbio –, com forma de bastonete, menos de 3 milésimos de milímetro de comprimento e tufos de "pelinhos" microscópicos, os flagelos, utilizados na locomoção. Em solos pobres em nitrogênio, os rizóbios são atraídos por substâncias eliminadas pelas raízes de certas plantas leguminosas, invadindo-as. Em resposta, as células das raízes sofrem transformações e multiplicam-se, originando dilatações em forma de nódulos nesses órgãos.

JOÃO PRUDENTE/PULSAR IMAGENS



NIGEL CATTLIN/SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA


C
Bactérias *Rhizobium* sp.
Solo
Raiz de leguminosa
Pelo absorvente
Rhizobium sp. no interior da célula da raiz
Penetração das bactérias na raiz
Nódulo formado por células com bactérias

ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

A. Plantação consorciada de uma planta não leguminosa (milho), com uma leguminosa (feijão). (Mossoró, RN, 2008.) **B.** Foto de uma planta de feijão, mostrando nódulos com rizóbios em suas raízes. Os nódulos possuem cerca de 2 mm. **C.** Representação esquemática da infecção de uma raiz de leguminosa pelo rizóbio, levando à formação de nódulos. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

6 As células dos nódulos das raízes passam a abrigar, no citoplasma, dezenas de rizóbios invasores, agora maiores e sem flagelos, que passam a ser chamados de bacteroides. Eles se alimentam das moléculas orgânicas produzidas pelas células hospedeiras, que também disponibilizam aos invasores um ambiente rico em gás oxigênio, essencial à respiração dessas bactérias.

7 Rizóbios são capazes de converter gás nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3). Além de constituir fonte de nitrogênio para a bactéria, a amônia também é utilizada pelas células infectadas da leguminosa. Portanto, é uma vantagem para a planta ter em suas raízes os rizóbios, que atuam como fornecedores microscópicos de fertilizante nitrogenado.

8 Ainda há muito a ser descoberto sobre a troca de benefícios entre rizóbios e leguminosas, tipo de relação que os biólogos denominam endossimbiose. Já se sabe, porém, que as células da planta se tornam participantes ativas na respiração do bacteroide. Quanto maior a quantidade de gás oxigênio disponível, maior a eficiência da bactéria em converter N_2 em NH_3, ou seja, em fixar nitrogênio atmosférico. E isso beneficia a planta.

9 Entre as características da planta que permitem a seus hóspedes respirar mais e melhor está a produção da proteína leghemoglobina pelas células infectadas. Assim como a hemoglobina de nosso sangue, essa proteína é capaz de capturar gás oxigênio. Segundo estudos recentes, a leghemoglobina garante aos bacteroides a afluência de gás oxigênio suficiente para que mantenham altas taxas de respiração celular e, consequentemente, muita fixação de nitrogênio. Quanto mais nitrogênio excedente sobrar para a leguminosa, melhor para ela. E também para nós!

Guia de leitura

Responda em seu caderno

O texto trata de dois temas importantes: o primeiro refere-se à técnica milenar da adubação verde. Esse tema é bastante documentado na internet, com muitos *links* disponíveis, com textos, fotos e vídeos. O segundo trata da importância ecológica de um microrganismo, o rizóbio, e de como o conhecimento científico pode nos levar a descobertas fantásticas, como a relação cooperativa entre plantas e bactérias, que traz benefícios a tantos seres vivos.

1 Leia os dois parágrafos iniciais do texto. A partir deles, defina em uma frase sintética o que é adubação verde. Por que essa técnica utiliza plantas leguminosas? Eleja os conceitos-chave desses parágrafos e inicie a elaboração de uma listagem desses termos no caderno.

2 O terceiro parágrafo menciona duas formas de adubação verde. Quais são elas? Continue a destacar os conceitos mais importantes do parágrafo.

3 Leia o parágrafo 4, que trata dos principais benefícios da adubação verde. Quais são eles?

4 O quinto parágrafo cita uma bactéria fixadora de nitrogênio, o rizóbio. Resuma, em uma frase curta, a ideia central do parágrafo.

5 No sexto parágrafo aparece o conceito de bacteroide. Defina-o objetivamente. Avalie se esse conceito deve figurar em sua lista.

6 Leia os parágrafos 7 e 8. Eles tratam das trocas de benefícios entre o rizóbio e a leguminosa. Qual é a vantagem de cada um deles na associação?

7 No oitavo parágrafo aparece o conceito de endossimbiose, que merece ser destacado e fazer parte de sua lista. Pesquise esse termo em outras fontes, ampliando seu significado. Pesquise também o conceito de simbiose. Por fim, escreva um texto curto caracterizando endossimbiose.

8 No último parágrafo comenta-se como certa característica das leguminosas garante sua obtenção de nitrogênio a partir do “excedente” produzido pelos rizóbios. Certifique-se de ter compreendido que característica é essa. Será que tal “característica da leguminosa” traz benefícios à nossa espécie? Utilize o que estudou no capítulo e leu neste texto para refletir sobre essa questão. Avalie se há mais algum conceito-chave para destacar e finalize a lista feita no caderno.

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

Escreva, em seu caderno, o termo abaixo que substitui corretamente a tarja entre parênteses das frases de 1 a 4.

a) consumidores
b) decompositores
c) níveis tróficos
d) produtores

1. (▬) são organismos autotróficos, capazes de produzir seu próprio alimento a partir de moléculas inorgânicas e energia do meio. 1. d

2. (▬) são organismos especializados em degradar a matéria orgânica de cadáveres e resíduos orgânicos. 2. b

3. Organismos heterotróficos, que necessitam obter substâncias orgânicas de outros seres vivos, são genericamente denominados (▬). 3. a

4. Os diferentes papéis desempenhados por seres autotróficos e heterotróficos em uma cadeia alimentar são (▬). 4. c

Escreva, em seu caderno, o termo abaixo que substitui corretamente a tarja entre parênteses das frases de 5 a 8.

a) biomassa
b) cadeia alimentar
c) pirâmide ecológica
d) teia alimentar

5. A quantidade de matéria orgânica presente em um organismo ou em um nível trófico constitui a (▬). 5. a

6. (▬) refere-se à rede de interações alimentares em uma comunidade biológica. 6. d

7. Uma sequência linear de organismos, isolada de seu conjunto por questões didáticas, e que tem em sua base os produtores é uma (▬). 7. b

8. (▬) é uma representação gráfica que destaca a dissipação energética nos diversos níveis tróficos. 8. c

9. Combustíveis fósseis são: 9. b

a) moléculas inorgânicas ricas em energia, formadas no fundo dos mares primitivos.
b) moléculas orgânicas ricas em energia, formadas a partir de seres que viveram no passado.
c) moléculas orgânicas ricas em energia, formadas a partir da fotossíntese de seres atuais.
d) misturas de diversos tipos de moléculas inorgânicas ricas em energia, extraídas de rochas fósseis submersas.

10. Uma teia alimentar é constituída por árvores frutíferas, bactérias e fungos do solo, coelhos, capim, serpentes, gafanhotos, gaviões e insetos frutívoros (isto é, que comem frutos). Nessa teia, são consumidores secundários: 10. d

a) árvores frutíferas, bactérias e fungos.
b) bactérias e fungos.
c) coelhos, serpentes e gaviões.
d) serpentes e gaviões.
e) insetos frutívoros e gafanhotos.

11. O conceito de onívoro refere-se a 11. b

a) qualquer espécie que tenha alimentação diferente da alimentação humana.
b) organismos que ocupam mais de um nível trófico nas teias alimentares.
c) uma espécie que ocupa sempre o mesmo nível trófico em uma teia alimentar.
d) denominação específica do nível trófico dos decompositores.

12. Ao avaliar os custos de engorda de duas espécies de herbívoro, um fazendeiro descobriu que, com os mesmos tipos e quantidades de alimento, os representantes de uma das espécies ganhavam mais biomassa no mesmo tempo. Os parâmetros em questão referem-se a que conceito? 12. d

a) Produtividade primária bruta (PPB).
b) Produtividade primária líquida (PPL).
c) Produtividade secundária bruta (PSB).
d) Produtividade secundária líquida (PSL).

13. Imaginemos, a título de exercício, que uma classe especial de consumidor, os decompositores, deixasse de atuar na natureza.

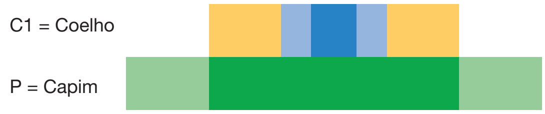
Qual seria uma consequência plausível desse evento imaginário? 13. c

a) A curto prazo, deixaria de ocorrer fotossíntese.
b) A longo prazo, os herbívoros deixariam de comer plantas e se tornariam carnívoros.
c) A longo prazo, elementos químicos essenciais à vida deixariam de estar disponíveis.
d) As consequências seriam mínimas, uma vez que os decompositores ocupam o fim da cadeia alimentar.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

Analise o gráfico a seguir, que representa uma pirâmide de energia.



ADILSON SECCO

P é o produtor, exemplificado como capim; C1 é um consumidor primário, representado pelo coelho. O desafio, nas questões 14 a 16, é identificar o significado das cores do gráfico e refazer a pirâmide no caderno, aplicando legendas para cada cor.

14. A base da pirâmide representa o nível dos produtores (P). Ela tem uma área em verde mais escuro, que corresponde à energia que pode efetivamente ser transmitida ao nível trófico seguinte. Tendo em mente essa afirmação, responda:

a) O que representam as áreas da base da pirâmide em verde mais claro? Justifique sua resposta.

b) Analisando a pirâmide sob o ponto de vista da produtividade, o que representariam, respectivamente, as áreas em verde mais escuro e mais claro? Por quê?

15. No retângulo superior da pirâmide, correspondente ao nível dos consumidores primários (C1), há duas áreas coloridas em azul mais claro e outra em azul mais escuro. Por analogia ao que se discutiu para o nível trófico dos produtores, responda:

a) Se o coelho se exercitasse muito, que parte azul do gráfico aumentaria: as mais claras ou a mais escura? Por quê?

b) Analisando a pirâmide sob o ponto de vista da produtividade, o que representariam, respectivamente, as áreas em azul mais claro e aquela em azul mais escuro? Por quê?

16. Note as partes do gráfico coloridas em amarelo. Tendo em vista o que foi discutido nas questões anteriores, o que elas representam? Explique.

17. Um animal ruminante, como um boi, consome muito alimento vegetal, porém não possui enzimas que digerem celulose, principal constituinte do capim e outras plantas. Além disso, o capim é pobre em proteínas. Entretanto, nos compartimentos estomacais do ruminante desenvolvem-se grandes quantidades de microrganismos que o animal digere de tempos em tempos; é deles que vem a maior parte das moléculas orgânicas que alimentam o boi. Assim, o estômago de um ruminante é uma verdadeira câmara de cultivo de micróbios nutritivos. Considerando esse fato, o que você poderia discutir sobre a posição do boi na teia alimentar?

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

18. **Pesquisa: Construindo uma teia alimentar do manguezal**

O objetivo desta atividade é descobrir de que se alimentam alguns animais do manguezal para, então, elaborar uma teia alimentar desse ecossistema. Em grupo, consulte livros, *sites* confiáveis ou o próprio livro, no capítulo em que esse ecossistema é tratado.

Para organizar sua pesquisa, oriente-se pelas seguintes questões:

- Onde se localizam os manguezais?
- Quais são suas características gerais?
- Qual é a importância do manguezal para as populações humanas?
- Quais são seus principais organismos produtores e consumidores?
- De que se alimentam esses organismos?

De posse dessas informações, produza um cartaz com um infográfico que represente uma teia alimentar do manguezal, assim como os demais dados levantados. Como é característico dos infográficos, as imagens devem ser informativas e o texto deve ser objetivo e conciso, resumindo os principais aspectos do assunto tratado.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (Fuvest-SP) O cogumelo *shitake* é cultivado em troncos, onde suas hifas nutrem-se das moléculas orgânicas componentes da madeira. Uma pessoa, ao comer cogumelos *shitake*, está se comportando como 1. c

a) produtor.
b) consumidor primário.
c) consumidor secundário.
d) consumidor terciário.
e) decompositor.

2. (UFSCar-SP) No aparelho digestório de um boi, o estômago é dividido em 4 compartimentos. Os dois primeiros, rúmen e barrete (ou retículo), contêm rica quantidade de bactérias e protozoários que secretam enzimas que decompõem a celulose do material vegetal ingerido pelo animal. O alimento semidigerido volta à boca onde é remastigado (ruminação) e novamente deglutido.

Os dois outros compartimentos, ômaso e abômaso, recebem o alimento ruminado e secretam enzimas que quebram as proteínas das bactérias e dos protozoários que chegam continuamente dos compartimentos anteriores. Considerando apenas o aproveitamento das proteínas bacterianas na nutrição do boi, é **correto** afirmar que o boi e os microrganismos são, respectivamente, 2. e

a) consumidor primário e decompositores.
b) consumidor secundário e decompositores.
c) consumidor primário e produtores.
d) consumidor primário e consumidores secundários.
e) consumidor secundário e consumidores primários.

3. (Fuvest-SP) Uma lagarta de mariposa absorve apenas metade das substâncias orgânicas que ingere, sendo a outra metade eliminada na forma de fezes. Cerca de 2/3 do material absorvido é utilizado como combustível na respiração celular, enquanto o 1/3 restante é convertido em matéria orgânica da lagarta.

Considerando que uma lagarta tenha ingerido uma quantidade de folhas com matéria orgânica equivalente a 600 calorias, quanto dessa energia estará disponível para um predador da lagarta? 3. a

a) 100 calorias.
b) 200 calorias.
c) 300 calorias.
d) 400 calorias.
e) 600 calorias.

4. (Enem-MEC) A falta de água doce no planeta será, possivelmente, um dos mais graves problemas deste século. Prevê-se que, nos próximos vinte anos, a quantidade de água doce disponível para cada habitante será drasticamente reduzida. Por meio de seus diferentes usos e consumos, as atividades humanas interferem no ciclo da água, alterando 4. b

a) a quantidade total, mas não a qualidade da água disponível no planeta.
b) a qualidade da água e sua quantidade disponível para o consumo das populações.
c) a qualidade da água disponível, apenas no subsolo terrestre.
d) apenas a disponibilidade de água superficial existente nos rios e lagos.
e) o regime de chuvas, mas não a quantidade de água disponível no planeta.

Questões discursivas

5. (Fuvest-SP) Resultados de uma pesquisa publicada na revista *Nature*, em 29 de julho de 2010, mostram que a quantidade média de fitoplâncton dos oceanos diminuiu cerca de 1% ao ano, nos últimos 100 anos. Explique como a redução do fitoplâncton afeta:

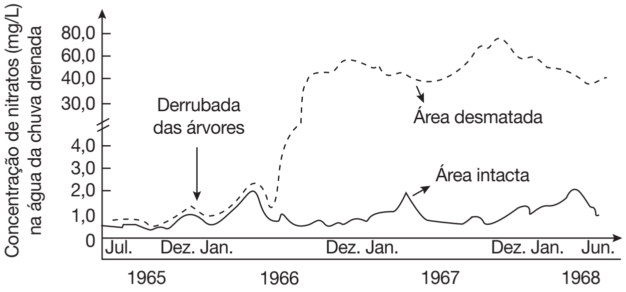
a) os níveis de carbono na atmosfera.
b) a biomassa de decompositores do ecossistema marinho.

6. (UFRRJ)

> Os sul-africanos estão atravessando uma grave crise na alimentação, causada pelo esgotamento do solo na região. Para minimizar o problema, a Universidade da Califórnia desenvolveu uma técnica para recuperar os solos esgotados, que consiste em plantar árvores de leguminosas em meio a lavouras de alimentos.
>
> (Adaptado de *Ciência Hoje*, SBPC, v. 33, n. 193, p. 51, maio 2003.)

De que maneira essa técnica ajuda na recuperação do solo?

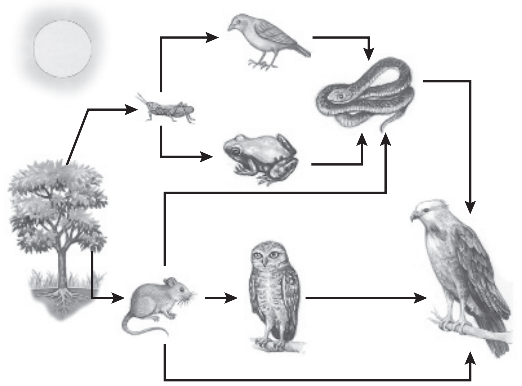
7. (Fuvest-SP) Após alguns meses de monitoramento de uma região de floresta temperada (de julho a dezembro de 1965), a vegetação de uma área foi derrubada e impediu-se o crescimento de novas plantas. Tanto a área de floresta intacta quanto a área desmatada continuaram a ser monitoradas durante os dois anos e meio seguintes (de janeiro de 1966 a junho de 1968). O gráfico a seguir mostra as concentrações de nitratos presentes nas águas de chuva drenadas das duas áreas para córregos próximos.



ADILSON SECCO

a) Se, em 1968, a vegetação da área intacta tivesse sido removida e ambas as áreas tivessem sido imediatamente usadas para cultivo de cereais, era de se esperar que houvesse maior produtividade de grãos em uma delas? Por quê?
b) Qual elemento químico do nitrato é fundamental para a manutenção de um ecossistema? Por quê?

8. (UFV-MG) Na maioria dos ecossistemas naturais encontramos vários tipos de produtores e de consumidores. A existência de várias opções alimentares interliga as cadeias em uma teia alimentar, como exemplificado abaixo.



OSVALDO SEQUETIN

Com base na figura e nos conceitos ecológicos, resolva, em seu caderno, os itens:

a) A qual(is) ordem(ns) de consumidor(es) pertence a cobra?
b) Independentemente da ordem que ocupam, quantos consumidores pertencem a um único nível trófico?
c) Explique como o gavião poderia ocupar o nível trófico inferior ao da cobra.

Capítulo 9 A dinâmica das populações

HUNG CHUNG CHIH/SHUTTERSTOCK

Pessoas caminhando pela cidade turística de Yangshuo (China, 2015).

A população humana: quanto ainda vamos crescer?

Os dados sobre o crescimento da população humana são realmente impressionantes. Segundo as últimas estimativas, a população mundial atingiu 7,2 bilhões de pessoas em 2015; em 1950, girava em torno de "apenas" 2,5 bilhões. Ou seja, o número de seres humanos no planeta quase triplicou nos últimos 65 anos e poderá ultrapassar os 11 bilhões em 2100. Esse crescimento será puxado, principalmente, por países da África subsaariana. Estima-se que a Nigéria será o terceiro entre os países mais populosos do mundo, passando de 173 milhões para mais de 530 milhões em 2100.

Segundo dados publicados pelo Fundo de Populações das Nações Unidas, o primeiro bilhão de pessoas foi atingido em 1804; a população teria levado então cerca de 123 anos para atingir os 2 bilhões de pessoas, em 1927, cerca de 47 anos para atingir 4 bilhões de pessoas, em 1974, e estima-se que levará apenas cerca de 50 anos para dobrar novamente, atingindo 8 bilhões de pessoas em 2024.

O crescimento populacional humano é motivo de preocupação, e não é de hoje. Em 1798, o demógrafo e economista Thomas Malthus teorizou que a população humana crescia em progressão geométrica, enquanto a capacidade de produzir alimentos crescia em progressão aritmética. Consequentemente, sua previsão era que ocorreria fome e crise social a menos que o crescimento populacional fosse controlado. Dizia Malthus: ''Pode-se seguramente afirmar que, se a população não for contida por algum tipo de freio, dobrará de 25 em 25 anos, crescendo em progressão geométrica (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, ...). [...] Por outro lado, os meios de subsistência, nas circunstâncias mais favoráveis, só poderiam aumentar, no máximo, em progressão aritmética (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, ...)".

As conclusões de Malthus, entretanto, não consideravam que poderia haver progressos científicos e tecnológicos que levariam à maior produção de alimentos, além de diversos outros fatores, como a evolução dos métodos de controle da natalidade, a diminuição do número de filhos por casal e o planejamento familiar. A principal crítica a Malthus e aos seus seguidores mais modernos, os neomalthusianos, é a visão simplista de que a pobreza e a fome no planeta decorrem apenas do crescimento populacional, e não da má distribuição das riquezas. Além disso, uma corrente de pensamento defende exatamente o contrário, que a superpopulação é consequência da pobreza, da falta de informação e de melhores condições de vida.

Como sugerido nesta seção, incentive os alunos a discutir e opinar sobre o crescimento da população humana, considerando diferentes enfoques: socioeconômico, político e ambiental. Esse assunto permite a integração com diferentes disciplinas, como Geografia, História, Filosofia e Matemática. Incentive a pesquisa, partindo de questões propostas pelos alunos e estimule-os a divulgar e expressar suas ideias por diferentes meios: comunicação digital, teatro, música, dança etc.

A importância do assunto

Quais são os limites para o crescimento da população mundial? A população biológica – conjunto de indivíduos de mesma espécie que habita determinada região – é uma importante unidade ecológica, como veremos neste capítulo. O estudo de certas características da população, ao longo do tempo, informa se ela está em expansão, em declínio ou estável, o que permite estabelecer correlações com fatores como disponibilidade de alimento, clima etc.

Com relação ao crescimento da população humana, ainda há muita divergência. Alguns acham que se trata de um problema secundário, uma vez que a miséria e a fome no mundo estão mais relacionadas com as más políticas de distribuição de recursos do que com a superpopulação. Entretanto, não há dúvida de que muitos problemas da humanidade se agravam quando o ambiente natural é degradado, e isso é decorrência da quantidade de pessoas que o exploram.

Vale a pena discutir a diversidade de pontos de vista sobre esse assunto, que tende a se tornar cada vez mais relevante. Diversos dados sobre a população do Brasil e de outros países podem ser obtidos no *site* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, www.ibge.gov.br).

Estar informado sobre os debates a respeito do crescimento da população humana é uma ação pela cidadania. Se você ainda não acompanhava de perto esse tema, comece conosco neste capítulo.

9.1 O que é uma espécie biológica?

Desde a infância, desenvolvemos um conceito informal de espécie. Quando uma criança identifica um gato ou um cavalo, ela está reconhecendo nesses animais uma série de características típicas das espécies às quais eles pertencem.

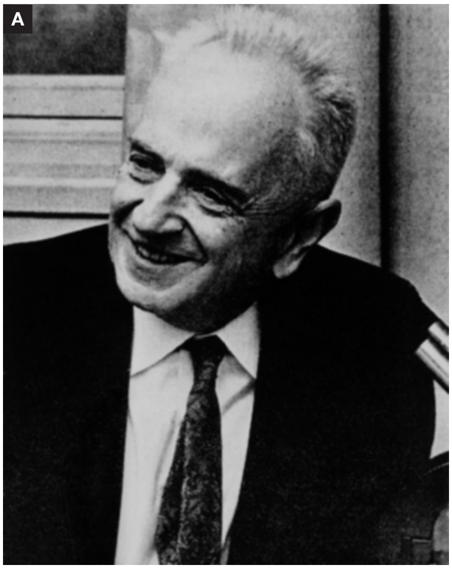
Curiosamente, logo após a publicação de seu livro *A origem das espécies*, em 1859, o naturalista inglês Charles Darwin foi questionado por Thomas Henry Huxley, também naturalista, quanto ao título da obra: o que seria uma espécie? Darwin respondeu que, embora ainda não houvesse uma definição de espécie que satisfizesse plenamente os naturalistas, todos eles tinham certa noção do que se queria dizer quando se falava em espécie.

A resposta de Darwin continua válida, mesmo tendo sido dada há mais de 150 anos. Até hoje, não se tem uma definição satisfatória para o conceito de espécie biológica. Alguns chegam a questionar se realmente há espécies na natureza ou se elas não seriam apenas "invenções" arbitrárias dos biólogos, em sua desafiadora tarefa de conceituar e organizar o conhecimento.

A maioria dos estudiosos, entretanto, admite que o conceito de espécie é importante para a Biologia. O que ainda não se conseguiu foi elaborar um conceito realmente operacional que permita distinguir inequivocamente cada uma das espécies biológicas.

O conceito de espécie ganhou destaque a partir dos trabalhos do botânico sueco Lineu (Carl von Linné, 1707-1778), que lançou as bases da moderna classificação biológica. Na primeira edição de seu livro *Systema Naturae* (*Sistema da natureza*), de 1735, Lineu assumiu a espécie como a categoria mais básica da classificação, conceituando-a como um grupo de indivíduos com grandes semelhanças estruturais e fisiológicas.

Nas décadas de 1930 e 1940, dois eminentes biólogos e divulgadores da teoria evolucionista, Theodosius Dobzhansky (1900-1975) e Ernst Mayr (1904-2005), propuseram uma definição para **espécie biológica** que ficou conhecida como conceito biológico de espécie. Segundo esse conceito, largamente utilizado até hoje, espécies são grupos de populações naturais que cruzam entre si e que estão reprodutivamente isoladas de outros grupos semelhantes. (Fig. 9.1)



SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

AKG-IMAGES/BRUNI MEYA/NEWSCOM/FOTOARENA

Figura 9.1 O geneticista ucraniano Theodosius Dobzhansky (**A**) e o zoólogo alemão Ernst W. Mayr (**B**) foram dois importantes artífices da teoria sintética da evolução, na qual conhecimentos genéticos, desconhecidos na época de Darwin, foram integrados e articulados à teoria darwinista da seleção natural. Deles é a autoria do conceito biológico de espécie.

Observe que o conceito biológico de espécie não menciona a semelhança estrutural dos indivíduos, mas sua capacidade de cruzar com indivíduos da mesma espécie. Mesmo que pertençam a populações geograficamente separadas, os membros de uma espécie são capazes de cruzar entre si e produzir descendência fértil, se puderem se reunir em condições naturais.

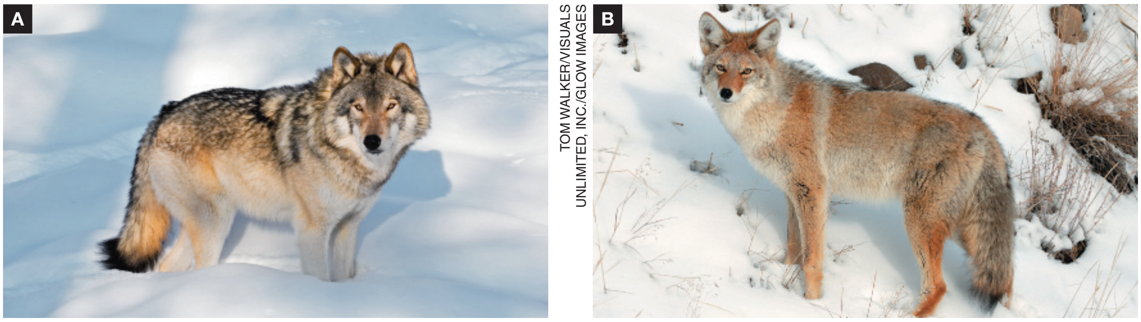
Embora teoricamente bem fundamentado, o conceito biológico de espécie tem limitações: primeira, ele não se aplica a espécies sem reprodução sexuada, como as de bactérias e arqueas; segunda, esse conceito é pouco operacional; é difícil testar se os membros de duas supostas espécies cruzam ou não entre si em condições naturais; cruzamentos em cativeiro não constituem prova, uma vez que a condição de cativeiro altera o comportamento natural dos indivíduos.

Na prática, os biólogos continuam a utilizar como critério de classificação diversas características cuidadosamente escolhidas entre aspectos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e genéticos. A ideia é que, ao longo do processo evolutivo, cada espécie desenvolveu características típicas, que não foram compartilhadas com outras espécies devido ao isolamento reprodutivo. Portanto, “novidades” evolutivas surgidas em cada espécie, decorrentes do isolamento, permaneceram como exclusividades da espécie. Assim, a escolha de características realmente exclusivas e relevantes é o que torna a classificação mais adequada.

Um nome para cada espécie

Há mais de três séculos, Lineu elaborou um sistema revolucionário de denominação para as espécies – a **nomenclatura binomial** –, segundo o qual o nome científico de uma espécie deve ser composto de duas palavras escritas em latim ou devidamente latinizadas. Se você conhece nomes como *Homo sapiens*, *Canis familiaris*, *Eqqus caballus* etc., já teve contato com o sistema binomial de Lineu.

A primeira palavra do nome científico refere-se ao gênero, que reúne espécies com características semelhantes. A segunda palavra do nome refere-se à espécie. Por exemplo, o nome científico do lobo é *Canis lupus* e o do coiote é *Canis latrans*, ou seja, pertencem ao gênero *Canis.* Além de uniformizar a grafia, o nome científico fornece informações sobre a semelhança de uma espécie com outras. Mesmo que nunca tivéssemos visto um coiote, saberíamos que ele tem semelhanças com o lobo pela simples leitura de seus nomes científicos. (Fig. 9.2)



BRUCE CORBETT/STOCK CONNECTION/GLOW IMAGES

TOM WALKER/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

Figura 9.2 Dois representantes do gênero *Canis*. **A.** Lobo, pertencente à espécie *Canis lupus*. **B.** Coiote, pertencente à espécie *Canis latrans*. A notável semelhança entre as espécies justifica classificá-las no mesmo gênero. O lobo e o coiote adultos medem, respectivamente, cerca de 140 cm e 80 cm de comprimento.

9.2 Características das populações

O conceito de população

Considere duas espécies distintas, uma de pássaros e outra de ratos, encontradas em ilhas de um arquipélago. Os pássaros, capazes de voar livremente entre as ilhas, podem se encontrar e cruzar entre si; de acordo com os biólogos, eles formariam uma única população distribuída pelas ilhas. Os ratos não conseguem nadar entre as ilhas e, consequentemente, o grupo presente em uma ilha não tem oportunidade de cruzar com grupos de ilhas vizinhas; cada ilha, portanto, teria sua própria população de ratos. A partir desse exemplo, pode-se definir **população biológica** como um conjunto de indivíduos de mesma espécie que convivem em determinada área e que podem cruzar entre si de forma natural.

Aplicando esse critério à espécie humana, pode-se dizer que a humanidade constitui uma única população biológica, que se distribui pelos diversos continentes do planeta. As migrações, facilitadas principalmente pela revolução nos transportes e nas comunicações, transformaram a humanidade em uma verdadeira “aldeia global”. Na linguagem cotidiana, entretanto, é comum a referência à “população” de um município, de um estado, de um país etc. O mais preciso, nesse caso, seria utilizar o termo subpopulação, mas, a favor da simplicidade, emprega-se a palavra população.

Densidade populacional

Uma informação importante a respeito de qualquer população é sua **densidade populacional**, que pode ser definida como a relação entre o número de indivíduos da espécie e a área ou o volume (no caso de hábitats aquáticos) que eles habitam. Essa definição está representada a seguir:

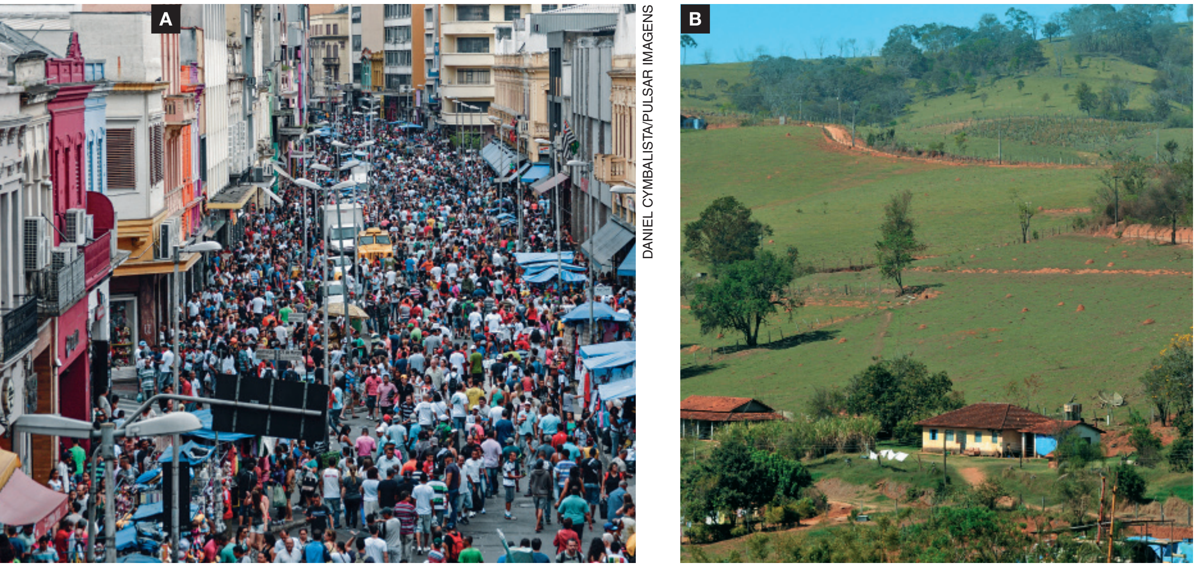
$$\text{Densidade populacional} = \frac{\text{Número de indivíduos}}{\text{Área ou volume}}$$

Na população humana, o estudo estatístico do tamanho populacional e de sua composição em idade e sexo, entre outros aspectos, constitui a **demografia** (do grego *demos*, povo, e *graphe*, descrição).

A densidade de uma (sub)população humana é denominada **densidade demográfica** e calculada com base em levantamentos periódicos, conhecidos como **censos demográficos**. Por exemplo, o censo realizado em 1990 estimou a população brasileira em aproximadamente 150 milhões de pessoas, distribuídas pelos 8,5 milhões de quilômetros quadrados de superfície do território nacional. Assim, a densidade demográfica do Brasil em 1990 era de aproximadamente 17,6 hab./km^2 (habitantes por quilômetro quadrado).

Em 2000, o censo mostrou que a população brasileira tinha aumentado para 169 milhões de pessoas; como o território permaneceu o mesmo, a densidade demográfica brasileira cresceu para 19,8 hab./km^2. Em 2006, o IBGE estimou a população brasileira em 186 milhões e, em 2010, em 190.732.694 pessoas, o que indica uma densidade demográfica de aproximadamente 22,4 hab./km^2.

Em outras palavras, na área hipotética de um quilômetro quadrado, em que havia aproximadamente 20 pessoas (19,8 hab./km^2) em 2000, passaram a viver duas pessoas a mais em 2010 (22,4 hab./km^2). (Fig. 9.3)



DANIEL CYMBALISTA/PULSAR IMAGENS

JOÃO PRUDENTE/PULSAR IMAGENS

Figura 9.3 No Brasil, há centros urbanos superpovoados até áreas rurais pouco ocupadas. **A.** Rua 25 de Março, na cidade de São Paulo (SP, 2013). **B.** Moradias no bairro Lima Rico, em Tuiuti (SP, 2014).

Taxas populacionais

Nos estudos populacionais, um aspecto importante é saber como uma população cresce. Para isso, estima-se a **taxa de crescimento populacional**, que é a variação (aumento ou diminuição) do número de indivíduos em determinado intervalo de tempo. Vamos concretizar essa definição analisando os dados ao lado (Tab. 9.1), relativos a duas populações hipotéticas de bactérias.

TABELA 9.1 TAMANHO DE DUAS POPULAÇÕES HIPOTÉTICAS AO LONGO DO TEMPO

Tempo	Número de bactérias/mL de meio de cultura	
	População A	População B
Início	10.000	200.000
Após 3 h	40.000	500.000

Para determinar a taxa de crescimento, primeiramente calculamos a variação do número de indivíduos no intervalo de tempo considerado. Para isso, tomamos o número de indivíduos da população no tempo final (*Nf*) e dele subtraímos o número de indivíduos no tempo inicial (*Ni*). Essa variação "bruta" é então dividida pelo número de indivíduos que havia na população no tempo inicial (*Ni*). Finalmente, esse número é dividido pela duração do período considerado (*t*). Veja a fórmula empregada no cálculo:

$$\text{Taxa de crescimento} = \frac{\dfrac{Nf - Ni}{Ni}}{t}$$

Você pode estar se perguntando o porquê de todos esses cálculos. Note que, ao dividirmos a variação "bruta" pelo tamanho inicial da população, estamos "relativizando-a". Isso é necessário porque, em números "brutos", a população A teve um acréscimo de apenas 30 mil indivíduos, enquanto a população B teve um acréscimo de 300 mil indivíduos no tempo considerado.

Isso indica que a população B cresceu mais que a A? Levando em conta o tamanho inicial da população, concluímos que não; pelo contrário, a população A teve o dobro da taxa de crescimento da população B. Pela variação bruta não é possível saber se o tamanho inicial da população A era muito menor que o da população B.

Por considerar o tamanho inicial da população, a taxa de crescimento é também chamada de **taxa de crescimento relativo (TCR)** da população.

Aplicando a fórmula, as taxas de crescimento relativo (TCR) para as duas populações de bactérias são:

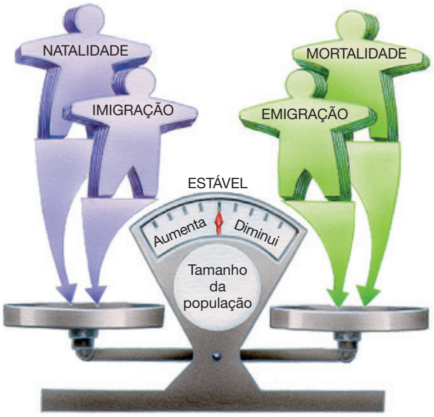
- TCR de A $= \dfrac{\dfrac{40.000 - 10.000}{10.000}}{3} = 1$ população por hora
- TCR de B $= \dfrac{\dfrac{500.000 - 200.000}{200.000}}{3} = 0{,}5$ população por hora

As taxas mostram que a população A cresce em ritmo mais acelerado que a população B. Em A, uma nova população foi acrescentada à antiga a cada hora, ou seja, a população dobrou de tamanho (cresceu 100%) a cada hora. Em B, a taxa de crescimento foi metade da ocorrida em A, ou seja, em uma hora a população cresceu 50% em relação à população inicial.

Taxas de natalidade e de mortalidade

O crescimento de uma população é determinado, fundamentalmente, por dois fenômenos de efeitos opostos: a **natalidade**, isto é, o número de indivíduos que nascem, e a **mortalidade**, o número de indivíduos que morrem.

Outros fatores que também afetam o tamanho de uma população são a **imigração**, que é a chegada de novos indivíduos, e a **emigração**, a saída de indivíduos. (Fig. 9.4)



ADILSON SECCO

Figura 9.4 O crescimento de uma população resulta da interação de quatro fatores: natalidade, mortalidade, imigração e emigração.

Na espécie humana, costuma-se expressar a **taxa de natalidade** como o número de crianças nascidas no período de um ano para cada 1.000 habitantes da população. Analogamente, a **taxa de mortalidade** é o número de óbitos (mortes) ocorridos no período de um ano para cada 1.000 habitantes da população.

Por que expressar o número de nascimentos para cada 1.000 habitantes, isto é, dividido por 1.000? Pelo mesmo motivo que dividimos um número por 100 ao expressar porcentagens: "relativizamos" os números brutos, ou seja, fazemos com que se tornem comparáveis aos de outras populações. Por exemplo, se ocorreram dois nascimentos por ano em uma população de 1.000 habitantes, a taxa de natalidade é igual a $\frac{2}{1.000}$ ou 0,002. Em outra população, de 4.000 habitantes, na qual tenham nascido 4 pessoas no mesmo ano, a taxa de natalidade é $\frac{4}{4.000}$ ou 0,001, a metade da primeira população.

$$\text{Taxa de natalidade} = \frac{\text{Número de nascimentos no ano}}{1.000 \text{ pessoas}}$$

$$\text{Taxa de mortalidade} = \frac{\text{Número de mortes no ano}}{1.000 \text{ pessoas}}$$

As taxas de mortalidade também podem ser detalhadas por faixa de idade. Quando se fala em **taxa de mortalidade infantil**, por exemplo, divide-se o número de óbitos de crianças com menos de 1 ano por 1.000 nascidos vivos no período de 1 ano.

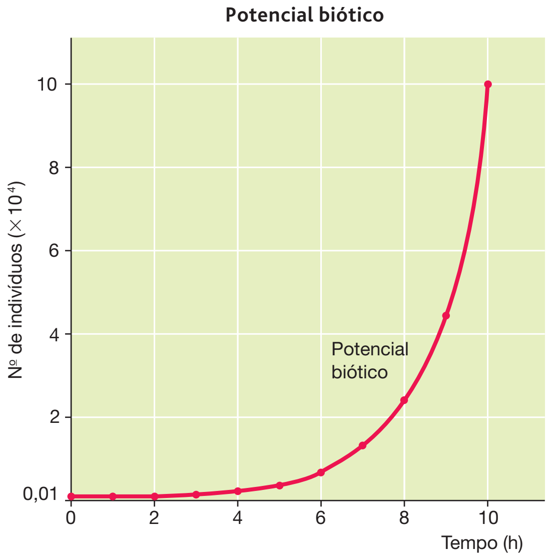
Índice de fertilidade

Uma informação importante sobre certos tipos de população é seu **índice de fertilidade**, definido como o número médio de descendentes produzidos por uma fêmea durante seu período reprodutivo.

No caso da espécie humana, se um país tem índice de fertilidade igual a 2, ou seja, se o número médio de filhos por mulher é 2, então se espera que os filhos de cada geração substituam seus pais. Isso sugere que a população tende a manter seu tamanho estável. Se o índice de fertilidade é superior a 2, há uma tendência ao crescimento populacional; se é inferior a 2, há uma tendência à diminuição do tamanho da população, o que às vezes é chamado de crescimento negativo.

Crescimento populacional

Em princípio, toda população tem potencial para crescer. Se a mortalidade fosse zero, uma única bactéria, reproduzindo-se a cada 20 minutos, produziria descendência suficiente para cobrir a Terra em apenas 36 horas! Um único paramécio poderia gerar, em alguns dias, uma massa de indivíduos correspondente a 10 mil vezes a massa planetária. Um único casal de pássaros e seus descendentes, chocando de 5 a 6 ovos por ano, produziria 10 milhões de descendentes em 15 anos. Essa capacidade teórica de crescimento de uma população biológica denomina-se **potencial biótico**. (Fig. 9.5)



Tempo (h)	Nº de indivíduos
0	100
1	200
2	400
3	800
4	1.600
5	3.200
6	6.400
7	12.800
8	25.600
9	51.200
10	102.400

Figura 9.5 Gráfico que mostra o potencial biótico para uma população de microrganismos com índice de mortalidade zero, no período considerado, e que duplica a cada hora. Gráficos com curva semelhante são esperados para qualquer população biológica. Esse tipo de curva é característico de um crescimento em progressão geométrica, em que, a intervalos iguais de tempo, o número de indivíduos da população dobra.

Em condições naturais, o potencial de crescimento de uma população é limitado pela disponibilidade de recursos do meio, como alimento, espaço, abrigo etc., e pela ação de predadores, parasitas e populações competidoras. A ação desses fatores, que em conjunto formam a chamada **resistência do meio**, é inversamente proporcional à densidade populacional, de forma que as taxas de natalidade e de mortalidade tendem a se equivaler e o número de indivíduos da população tende a permanecer mais ou menos constante ao longo do tempo. O limite máximo de indivíduos de uma população que o ambiente consegue suportar é a **capacidade de suporte** ou **carga biótica máxima** do meio.

Em uma representação gráfica, o crescimento de uma população a partir de uns poucos indivíduos descreve uma curva ascendente em forma da letra S, estabilizando-se em determinado ponto, quando é atingida a capacidade de suporte do meio. O aspecto da **curva de crescimento populacional** resulta da interação entre a taxa de crescimento intrínseco – o potencial para crescer – e a resistência do meio – o conjunto de fatores ambientais que limitam o crescimento da população. (Fig. 9.6)

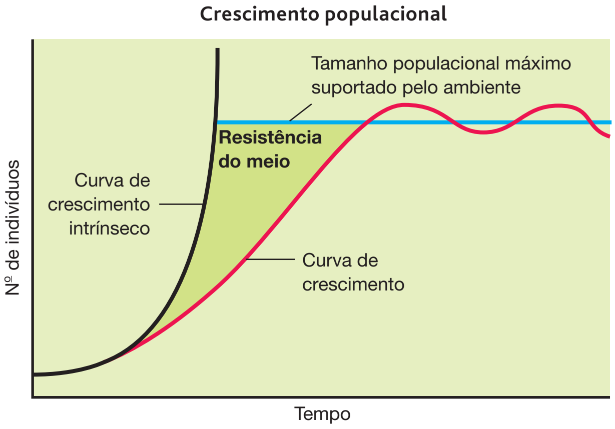


Figura 9.6 Gráfico que representa a curva de crescimento de uma população a partir de um pequeno número de indivíduos.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Amplie seus conhecimentos

O experimento de Gause com *Tribolium confusum*

Na década de 1930, o cientista russo Georgyi F. Gause (1910-1986) realizou uma série de experimentos clássicos sobre crescimento populacional. Em um deles, Gause colocou o mesmo número de besouros da espécie *Tribolium confusum* em dois lotes de caixas de cultivo. Em um dos lotes, cada caixa recebeu 16 g de farinha para alimentar os besouros. No outro lote, foram colocados 64 g de farinha por caixa, quatro vezes mais alimento que no primeiro lote. As quantidades originais de farinha eram repostas após certos períodos de tempo.

Gause contou periodicamente o número de indivíduos nas caixas ao longo de 150 dias de experimentação. O tamanho máximo atingido pela população no primeiro lote de caixas foi de 650 besouros, enquanto no segundo lote o número chegou a 1.750 besouros.

O experimento de Gause permitiu uma conclusão simples, mas importante: cada tipo de ambiente pode suportar uma quantidade máxima de indivíduos. Na experiência, os dois ambientes diferiam apenas na quantidade de alimento disponível, e esse foi o principal fator responsável pela diferença no crescimento das duas populações de *T. confusum*.

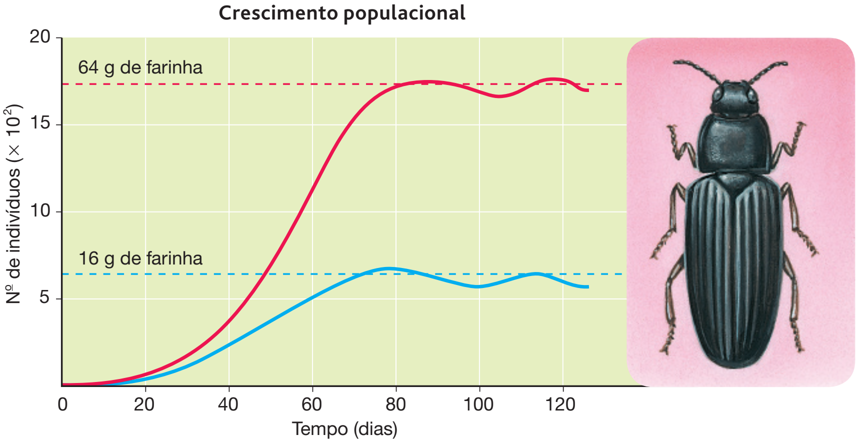


GRÁFICO: ADILSON SECCO
ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Gráfico que representa o crescimento de duas populações do besouro *Tribolium confusum*: uma criada com 16 g de farinha (curva em azul), e a outra, com 64 g de farinha (curva em vermelho). A linha tracejada corresponde à capacidade de suporte do meio, representada nesse experimento pela quantidade de farinha disponível para alimentar os besouros. Ao lado, representação de adulto de *T. confusum*, que mede cerca de 3,5 cm de comprimento.

9.3 Fatores que regulam o tamanho populacional

O crescimento de uma população biológica é limitado, entre outros fatores, pela densidade populacional, pela disponibilidade de alimentos, pela competição com indivíduos de outras espécies (competição interespecífica), pela predação e pelo parasitismo.

Em certas populações estudadas, quando a densidade populacional aumenta além de certo limite, a natalidade tende a diminuir. Isso geralmente se deve ao aumento da competição alimentar entre os membros da população e da competição entre os casais por locais de procriação (competição intraespecífica).

Na espécie de pássaros *Parus major*, por exemplo, o número médio de filhotes por ninho é 14 quando a densidade da população é inferior a um casal por hectare e 8 quando a densidade é de 18 casais por hectare.

Em experimentos com ratos, verificou-se que, quando as gaiolas de criação se tornavam superpovoadas, mesmo com alimento em abundância, a taxa de natalidade caía a zero. Muitos filhotes chegavam mesmo a morrer antes do nascimento, ainda no útero materno. A conclusão foi que essas mortes deviam estar relacionadas ao estresse e à tensão emocional decorrentes do superpovoamento.

Quanto mais intensos são os fatores limitantes do crescimento, menor é o crescimento populacional. Em contrapartida, o abrandamento de um ou mais fatores limitantes pode levar a uma maior taxa de crescimento da população. Como a intensidade dos fatores limitantes geralmente varia ao longo do tempo, o tamanho das populações sofre flutuações periódicas. (Fig. 9.7)

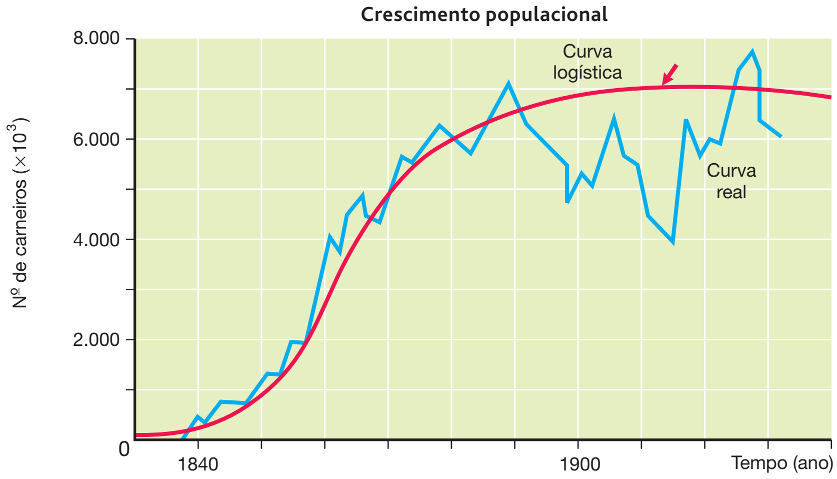
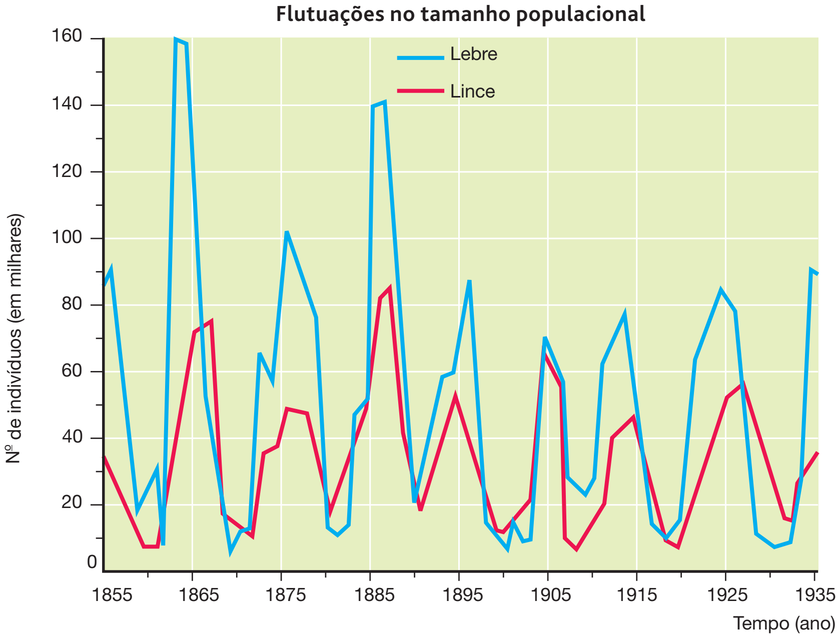


Figura 9.7 Gráfico que mostra a curva de crescimento da população de carneiros na Austrália, estimada com base em dados coletados entre as décadas de 1830 e 1930. A linha azul representa a população real, que oscila em decorrência das variações dos fatores ambientais que regulam o crescimento. A linha vermelha é a curva logística, representativa de uma população que se estabiliza ao ser atingida a capacidade de suporte do meio (seta). (Elaborado com base em Dajoz, R., 1978.)

Um exemplo clássico da regulação do tamanho populacional por meio da predação foi estudado em populações de linces e lebres da região ártica do Canadá. Os dados referentes ao comportamento dessas duas populações foram coletados durante 80 anos (de 1855 a 1935) pela Companhia da Baía de Hudson, que registrava o número de peles comercializadas pelos caçadores da região. Como o número de caçadores era conhecido e mudava pouco de um ano para outro, concluiu-se que as variações da quantidade de peles refletiam as variações do tamanho relativo das populações das espécies caçadas.

Traçando no mesmo gráfico as curvas de densidade das populações de lebres e de linces, verificou-se que a população de linces geralmente alcançava seu desenvolvimento máximo 1 a 2 anos após a população de lebres ter atingido o seu. Uma interpretação plausível é que o tamanho das populações de lebres e de linces depende da relação de predação entre essas duas espécies.

Quando a população de lebres aumenta, a de linces também cresce, graças à maior quantidade de alimento disponível. A maior quantidade de linces, por sua vez, intensifica a predação, o que causa diminuição da população de lebres. Agora, com menor quantidade de alimento disponível, a população de linces novamente diminui, o que permite a retomada do crescimento da população de lebres, e assim por diante. (Fig. 9.8)



ED CESAR/SCIENCE SOURCE/FOTOARENA

Figura 9.8 Gráfico que mostra as flutuações no tamanho das populações de lebres (em azul) e de linces (em vermelho) no Canadá, entre 1855 e 1935. (Elaborado com base em Dajoz, R., 1978.) Na fotografia, lince (*Lynx* sp.) perseguindo uma lebre branca (*Lepus* sp.) na neve. O lince e a lebre medem, respectivamente, cerca de 1 m e 50 cm de comprimento.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Apesar da comodidade dessa explicação, outras hipóteses podem ser aventadas para explicar a correlação entre as flutuações das duas populações. O aumento da população de lebres pode fazer com que outros fatores atuem de modo mais drástico; por exemplo, em condições de alta densidade populacional, o alimento disponível para as lebres pode ser insuficiente e a transmissão de doenças infecciosas pode ocorrer com maior rapidez, o que também pode causar a diminuição correlata da população de linces.

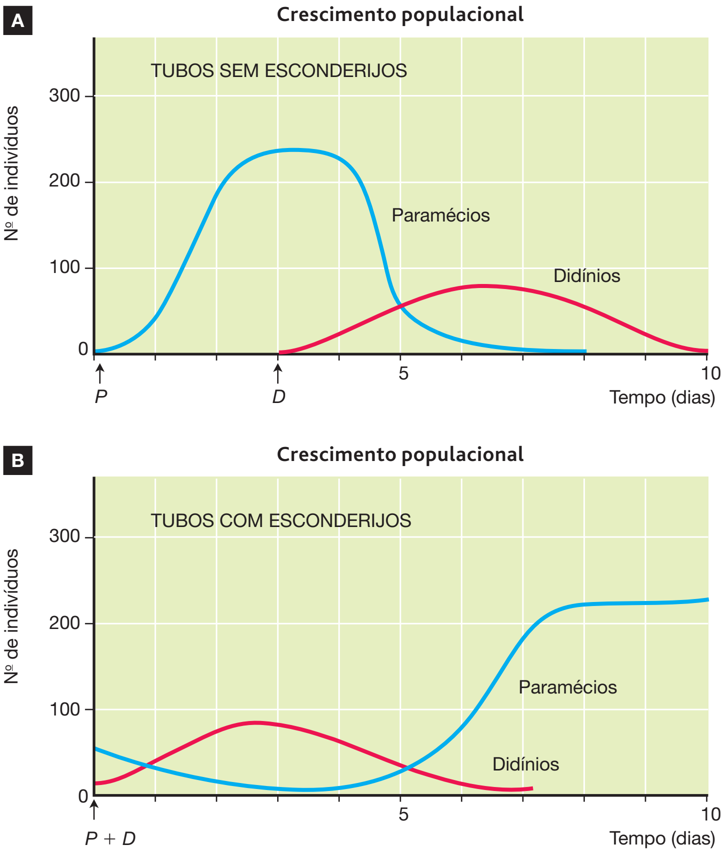
Outro exemplo de correlação entre a predação e a flutuação populacional foi obtido por Gause em experimentos realizados com uma espécie de paramécio (*Paramecium* sp.) e seu predador, o também protozoário ciliado didínio (*Didinium* sp.).

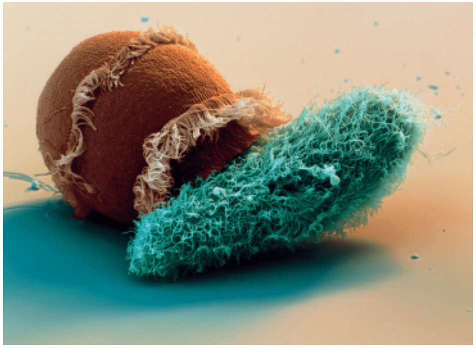
Ao se colocarem alguns exemplares de didínios em uma cultura de paramécios, a população destes últimos diminuía devido à predação, enquanto a população de didínios aumentava. Após algum tempo, os paramécios desapareciam e, logo depois, os didínios morriam de fome.

Gause imaginou que, se os paramécios tivessem um local para se esconder dos predadores, pelo menos alguns poderiam sobreviver. Para testar essa hipótese, utilizou tubos de cultura com partículas e resíduos no fundo, onde os paramécios poderiam se abrigar.

A previsão foi confirmada: a população de paramécios não desapareceu nos tubos em que havia esconderijos. A população de didínios, porém, extinguiu-se depois de apresentar um crescimento expressivo no início. A explicação mais plausível para a extinção é que, após a fácil predação inicial dos paramécios, ficou cada vez mais difícil para os didínios encontrar alimento.

Com a extinção dos didínios predadores, a população de paramécios pôde crescer novamente até atingir o tamanho máximo permitido pelas condições do meio, isto é, sua capacidade de suporte. (Fig. 9.9)





EYE OF SCIENCE/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 9.9 Na fotomicrografia, protozoário ciliado didínio (*Didinium* sp., colorizado em marrom) atacando um paramécio (*Paramecium* sp., colorizado em verde). (Microscópio eletrônico de varredura; aumento ≈ 240×.) Os gráficos mostram as curvas de crescimento de populações de paramécio (em azul) e de didínio (em vermelho) criadas em um mesmo tubo de cultura, em duas situações: (**A**) em tubos sem esconderijos para os paramécios; (**B**) em tubos com detritos no fundo, onde os paramécios podiam se esconder. As setas indicam os momentos em que foram introduzidos os paramécios (*P*) e os didínios (*D*) nas culturas. (Elaborados com base em Dajoz, R., 1978.)

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Apesar das condições ecológicas muito simplificadas do tubo de cultura, o experimento de Gause evidenciou as relações de interdependência entre populações de presas e predadores. A extinção dos didínios só ocorreu porque eles não tinham outro tipo de presa para substituir os paramécios. Pode-se imaginar que em uma comunidade biológica natural, com diferentes tipos de presa para os didínios e locais para os paramécios se esconderem, as duas populações poderiam apresentar flutuações relacionadas uma à outra, mas não se extinguiriam.

Ciência e cidadania

A população humana

Ainda há muita divergência quando o assunto é o crescimento da população humana. Vale a pena discutir a variedade de pontos de vista sobre esse tema cada vez mais relevante para o futuro da humanidade.

Quando o crescimento da população humana vai parar?

1 Uma população humana é semelhante a qualquer população biológica e está sujeita aos mesmos fatores gerais que regulam e limitam o crescimento populacional de outras espécies. Entretanto, a humanidade tem conseguido controlar alguns fatores ambientais, o que permite um formidável ritmo de crescimento.

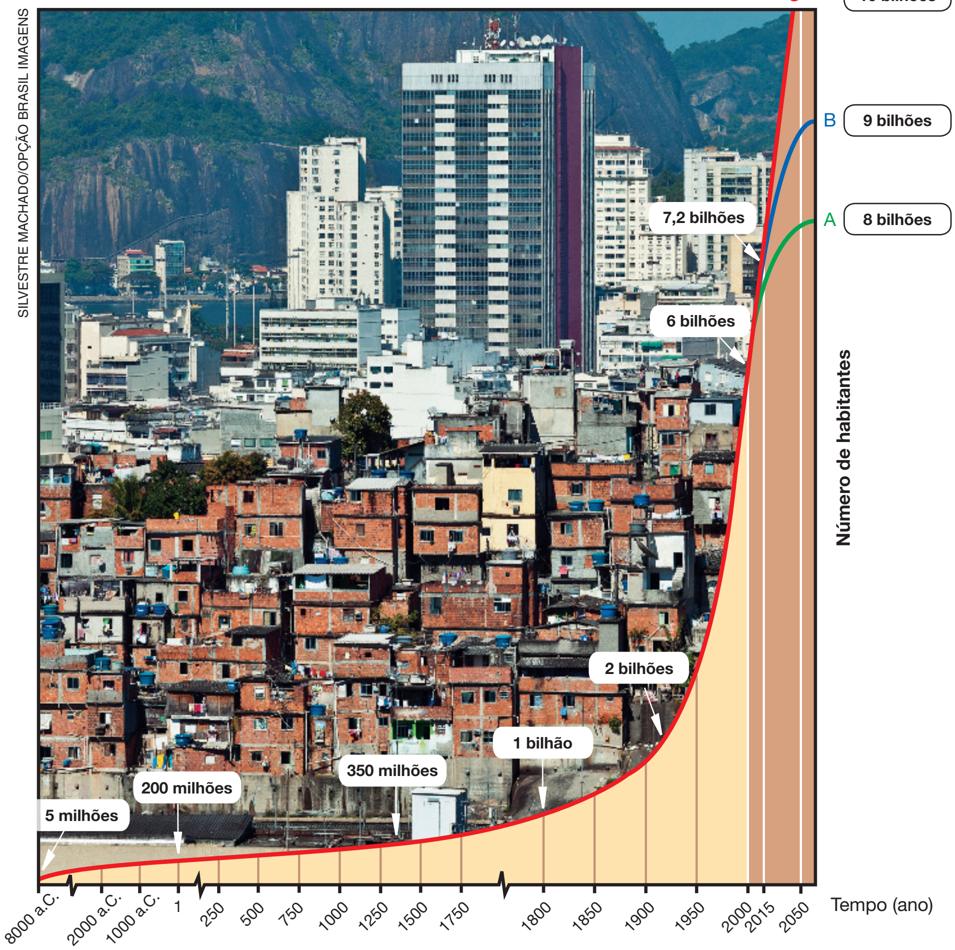
2 O crescimento acelerado da população humana deve-se principalmente à diminuição da taxa de mortalidade, decorrente tanto dos avanços agrícolas e tecnológicos, que aumentaram a produção de alimentos, como dos progressos médicos e sanitários, que prolongaram a expectativa de vida.

3 Um problema inerente à expansão demográfica ilimitada é a necessidade de uma produção maior de alimentos. Como alimentar um número cada vez maior de pessoas? Não é possível ampliar indefinidamente as áreas de terra cultivada. As terras férteis já estão sendo cultivadas e muitas delas já tiveram seus recursos esgotados; certas áreas demandariam tanto empenho para se tornarem produtivas que, pelo menos por enquanto, não há interesse em explorá-las.

4 Além disso, os ecossistemas naturais que ainda restam, como os da Amazônia, dos Cerrados e do Pantanal Mato-Grossense, não podem ser explorados de forma predatória. É preciso manter áreas preservadas para não se perder a diversidade biológica (biodiversidade) produzida ao longo de bilhões de anos de evolução.

5 Novas tecnologias agrícolas têm permitido aumentar a produtividade dos campos cultivados; excedentes de safras poderiam ser transferidos para países onde há falta de alimentos; é possível recuperar solos desgastados ou impróprios para o cultivo e promover o uso mais racional e eficiente das fontes de energia.

Crescimento da população humana



SILVESTRE MACHADO/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

ADILSON SECCO

O crescimento da população humana tem se acelerado nas últimas décadas e os cientistas têm feito projeções sobre as possíveis curvas de crescimento (A, B ou C, mostradas no gráfico). (Elaborado com base em *The New Encyclopaedia Britannica*. 15. ed. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1993. v. 25, p. 1.041.) Na fotografia, comunidade de Tavares Bastos, no Rio de Janeiro (RJ, 2011).

▶ **6** Entretanto, isso não basta para preservar o ambiente terrestre a curto prazo. É preciso frear o crescimento da população humana por meio do planejamento familiar e do controle deliberado da natalidade.

Planejamento familiar e controle da natalidade

7 Até a década de 1970, em certos países considerava-se o controle de nascimentos uma tese racista, reacionária ou imperialista. Hoje, os cidadãos da maioria das nações consideram importante realizar o controle da natalidade e o planejamento familiar para manter a qualidade de vida da população.

8 A maioria dos países desenvolvidos já conseguiu frear seu crescimento populacional. O mesmo tem ocorrido em alguns países em desenvolvimento, como a Tailândia, a Colômbia e a Costa Rica, que já alcançaram reduções substanciais de suas taxas de natalidade. Outros, porém, apesar das tentativas, ainda não alcançaram o sucesso desejado.

9 Embora os problemas da humanidade sejam decorrentes de vários fatores, imagina-se que, se o crescimento da população for freado, será possível ganhar tempo para resolver problemas como a fome, as desigualdades econômicas, a degradação ambiental e várias doenças, que seriam agravados num quadro de superpopulação.

10 O escritor Lester R. Brown iniciou um de seus livros, *O vigésimo nono dia*, publicado em 1980 (Editora da FGV), com uma pequena história: "Para ensinar às crianças a noção de crescimento exponencial, os professores franceses se valem de uma charada. Em uma lagoa flutua uma folha de árvore. A cada dia que passa, o número de folhas dobra: duas folhas no segundo dia, quatro no terceiro, oito no quarto, e assim por diante. Se a lagoa ficar inteiramente coberta de folhas no trigésimo dia, quando ela ficou coberta pela metade? Resposta: No vigésimo nono dia".

11 A lagoa corresponde ao nosso planeta, e as folhas, às pessoas da população. Talvez o planeta já esteja coberto pela metade e logo se tornará repleto de gente. O risco maior é ignorar os sinais da iminente saturação ou interpretá-los de modo errôneo. Como o trigésimo dia poderá não oferecer possibilidades de sobrevivência, é importante não chegar a ele; um dos caminhos para isso é limitar o crescimento demográfico.

12 Paradoxalmente, o aumento demográfico também está ligado ao grau de desenvolvimento no campo da saúde pública. A população cresce não apenas porque há mais nascimentos, mas também porque a duração média da vida humana tem aumentado. A expectativa de vida em 1650 era de 30 anos; hoje, a média mundial é de mais de 65 anos e, em países desenvolvidos, ultrapassa os 80 anos. De acordo com dados coletados em 2015 pelo IBGE, a expectativa de vida média no Brasil já passa dos 75 anos.

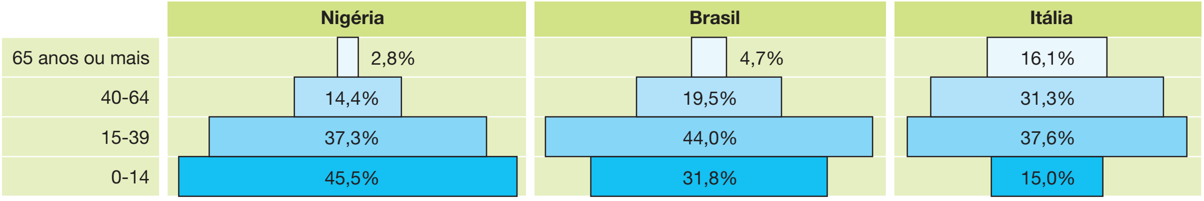
Pirâmides de idade

13 Uma análise importante da população humana refere-se à sua composição em idades, ou seja, o número de pessoas em cada faixa etária, por exemplo, de 0 a 14 anos, de 15 a 39, de 40 a 64 e acima de 65 anos.

14 A distribuição dos indivíduos de uma população por faixas de idade é expressa em gráficos conhecidos como pirâmides de idade ou pirâmides etárias.

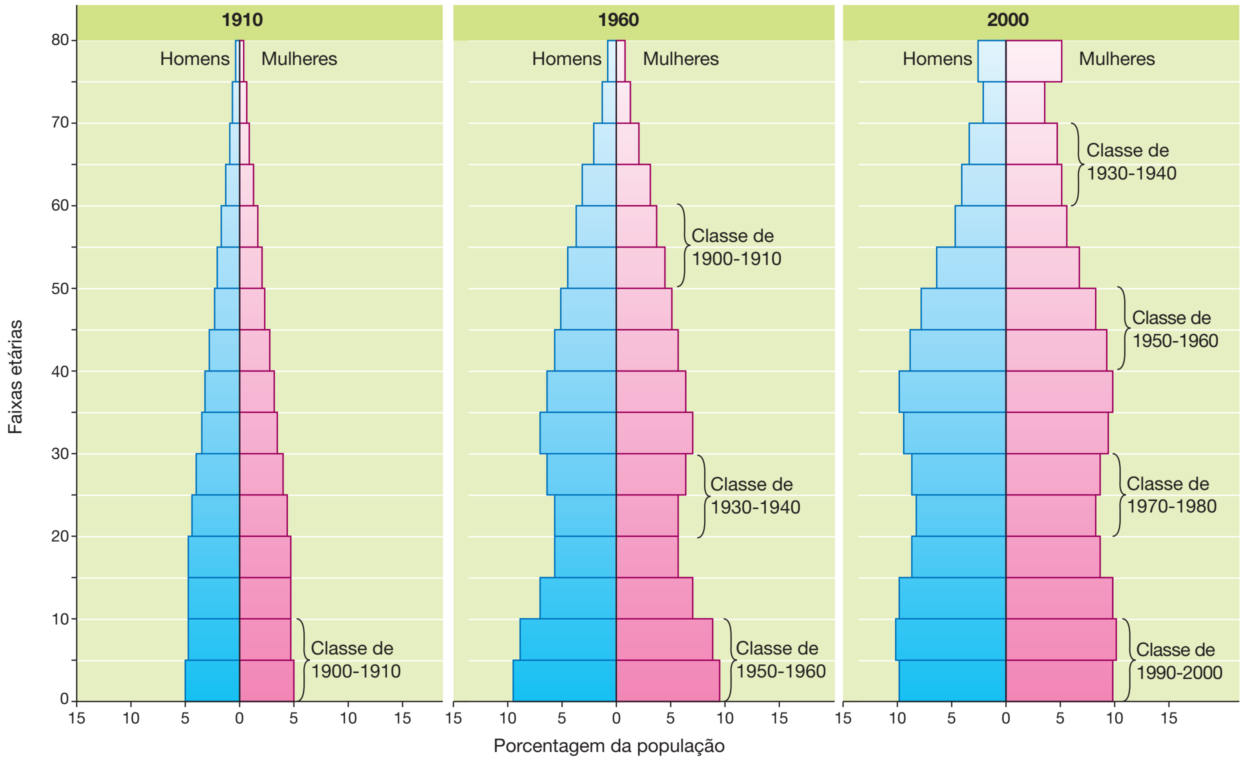
15 Populações jovens, com alta taxa de crescimento, são representadas por gráficos que têm realmente a forma de pirâmide, com a base mais larga que o ápice, o que indica elevada taxa de natalidade. Em populações que controlam a natalidade, o gráfico pode perder a forma de pirâmide, com a base, em certos casos, mais estreita que as faixas superiores. Essa forma, no entanto, não se mantém por muito tempo; se as baixas taxas de natalidade são mantidas, com o tempo a forma volta a ser de pirâmide, menos acentuada, mas com a base mais larga.

16 A análise de pirâmides de idade revela tendências do tipo de crescimento da população. Por exemplo, em uma população com muitas pessoas na faixa etária entre 0 e 14 anos (pirâmide com base larga) haverá, nos anos seguintes, grande número de pessoas na idade reprodutiva. Isso permite prever o crescimento da população num futuro próximo.



ADILSON SECCO

Parte A. Pirâmides de idade da Nigéria, do Brasil e da Itália para dados de 2010. (Elaboradas com base em <http://esa.un.org/wpp/population-pyramids/population-pyramids_percentage.htm>. Acesso em: jan. 2016.) A base larga e o ápice estreito da pirâmide da Nigéria indicam, respectivamente, alta taxa de natalidade e, provavelmente, alta taxa de mortalidade nas idades mais avançadas, o que dá um aspecto bem triangular ao gráfico. Na pirâmide da Itália, típica de países desenvolvidos, o gráfico tem base mais estreita e ápice mais largo, indicando, respectivamente, controle da natalidade e expectativa de vida elevada.



ADILSON SECCO

Parte B. Pirâmides de idade dos EUA nos anos 1910, 1960 e 2000. (Elaboradas com base em Mader, S. S., 1998.) Além de diversas classes de idade, a pirâmide também representa o número de homens e o de mulheres. Observe que as classes mais antigas vão "subindo" na pirâmide (acompanhe as classes de idade marcadas nos três casos). A análise dessas pirâmides permite fazer projeções sobre o crescimento das populações.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

1 Leia o primeiro parágrafo, que compara determinados aspectos da população humana com os de outras populações. A última frase revela fatores responsáveis pela expansão populacional da humanidade. Você consegue imaginar que fatores seriam esses? Confira, ao longo do texto, se esses pontos são esclarecidos.

2 Leia o segundo parágrafo e responda: ele responde à parte da questão que propusemos no item 1 deste guia? Compare-o com suas respostas.

3 Informe-se, nos parágrafos 3 e 4, sobre problemas decorrentes da expansão populacional humana. Faça um resumo dos aspectos que considerar mais importantes.

4 Nos parágrafos 5 e 6, comentam-se alternativas para minimizar o problema da superpopulação humana. Quais são elas?

5 Leia o parágrafo 7 e certifique-se de ter compreendido suas afirmações. Se possível, converse sobre o assunto com os professores de História, Geografia ou Sociologia. Anote ou grave os pontos mais importantes da conversa.

6 Informe-se, no parágrafo 8, sobre alguns países que já conseguiram reduzir suas taxas de natalidade. Considere esse tema para uma pesquisa.

7 Leia o parágrafo 9 e responda: qual é a importância, segundo o texto, de frear o crescimento da população humana?

8 O parágrafo 12 menciona outro fator, além do aumento da natalidade, para explicar a expansão demográfica. Qual é ele?

9 Leia os parágrafos 13 e 14 e responda: o que são pirâmides de idade ou pirâmides etárias?

10 Leia o parágrafo 15, que aborda diferentes formatos das pirâmides de idade. Analise também a parte A das pirâmides de idade acompanhando com a leitura da legenda correspondente. Que aspectos populacionais estão correlacionados com o formato das pirâmides etárias?

11 O parágrafo 16, que encerra o quadro, menciona a importância da análise das pirâmides de idade para prever o crescimento de uma população. Analise a parte B das pirâmides de idade e leia a legenda. Perceba que, nas pirâmides de anos posteriores, as classes etárias mais antigas vão "subindo". Responda: por que uma pirâmide de base larga indica uma tendência ao crescimento da população?

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. População biológica é o conjunto 1. b

a) de espécies que habitam determinada região.
b) de indivíduos de mesma espécie que vivem em determinada região, cruzando-se.
c) de comunidades que vivem em um biótopo.
d) formado pela comunidade biológica e pelo biótopo em interação.

2. Define-se capacidade de suporte como 2. b

a) a capacidade de uma espécie dar suporte a outra semelhante.
b) o tamanho máximo da população que o ambiente comporta.
c) o número mínimo de indivíduos de uma espécie admitido pelo ambiente.
d) o potencial da população de gerar descendentes como suporte do crescimento.

3. A taxa de crescimento (TC) de uma população é também chamada taxa de crescimento relativo (TCR), uma vez que leva em conta o(a) 3. c

a) resistência do meio.
b) tamanho do território.
c) tamanho inicial da população.
d) taxa de mortalidade infantil.

Considere os seguintes fatores relativos a uma população biológica para responder às questões 4 e 5.

a) Emigração
b) Imigração
c) Mortalidade
d) Natalidade

4. Qual ou quais fatores contribuem para o aumento da densidade populacional? 4. b; d

5. Qual ou quais fatores contribuem para a redução do tamanho populacional? 5. a; c

6. Uma população humana A teve 50 nascimentos e 25 mortes em um ano; no mesmo período, a população B teve 49 nascimentos e 20 mortes. Em qual delas a taxa de natalidade é maior? 6. d

a) Em A.
b) Em B.
c) As taxas são praticamente equivalentes em A e em B.
d) Faltam dados sobre as populações para calcular as taxas.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

7. A tabela a seguir refere-se a uma população experimental constituída, no tempo zero, por 100 indivíduos, metade machos e metade fêmeas, analisada por um período de seis anos. Utilize os dados da tabela para responder às questões.

Variação do número de indivíduos causada por	Tempo (em anos)					
	1	2	3	4	5	6
Nascimento	48	65	102	149	128	110
Imigração	4	19	21	10	2	1
Morte	10	12	20	35	65	75
Emigração	2	1	2	3	45	40

a) Calcule, ano a ano, o tamanho da população, considerando os dados de nascimento, morte, imigração e emigração (lembre-se de que a população inicial era de 100 indivíduos). No caderno, construa uma quinta linha da tabela, totalizando o número de indivíduos em cada ano. Em seguida, construa um gráfico para representar o crescimento da população, relacionando o número de indivíduos (no eixo das ordenadas) e o tempo decorrido (no eixo das abscissas).

b) Considere que a população ocupe a área de 1 km^2 em uma floresta. Acrescente mais uma linha à sua tabela, calculando, ano a ano, a densidade populacional. A seguir, construa um gráfico de barras verticais, em que o comprimento de cada barra representa o valor da densidade populacional. Consulte o professor sobre a melhor maneira de fazer um gráfico como esse.

c) Com base na análise dos dados e dos gráficos construídos, redija um texto curto para descrever a dinâmica dessa população em termos dos fatores analisados (natalidade, mortalidade, imigração, emigração, crescimento populacional e densidade).

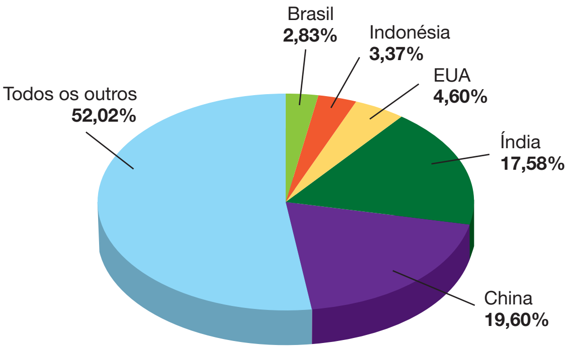
Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

8. Atividade prática: Trabalhando com tabelas e gráficos sobre a população do Brasil

Organizar informações na forma de tabelas e gráficos confere a elas um formato visual mais fácil de ser compreendido e interpretado. Por exemplo, gráficos de *pizza* são excelentes para mostrar a proporção entre as partes de um todo, como no mostrado a seguir, em que as "fatias" representam a população de alguns países em relação ao total da população mundial.

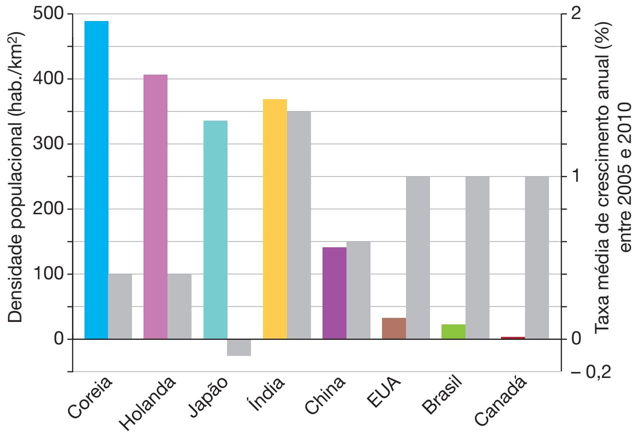
Contribuição de alguns países na população mundial



Fonte: Divisão de População das Nações Unidas; IBGE Países (2012).

Gráficos de barras permitem comparar diferentes dados ou grupos de dados pelo comprimento de barras verticais ou horizontais usadas para representá-los. As pirâmides de idade que estudamos no capítulo também são tipos de gráfico de barra.

Densidade populacional e taxa de crescimento de alguns países



Fonte: Divisão de População das Nações Unidas (2012).

Para fazer esta atividade, visite o *site* do IBGE (www.ibge.gov.br) e encontre duas tabelas – a do censo demográfico de 2000 e a do censo de 2010 – referentes a "População residente, por situação de domicílio e sexo, segundo os grupos de idade". Sugerimos que você faça o *download* das tabelas em formato pdf (*portable digital file*) e imprima-as. Trabalhar na cópia impressa é importante, pois permite fazer marcações e anotações com facilidade. Se tiver dúvidas sobre como "baixar" as tabelas, consulte o professor.

A atividade consiste em selecionar dados das duas tabelas para elaborar gráficos. Esse trabalho de seleção demanda atenção e tempo, por isso propomos que ele seja realizado em grupos de 4 ou 5 pessoas e que as tarefas sejam divididas entre os colegas.

Essas tabelas também estão reproduzidas no **Suplemento para o professor**, em *Páginas para reproduzir*.

Gráficos de *pizza*

Para começar, localize os dados constantes na linha superior das tabelas, na qual os resultados estão totalizados. Calcule as porcentagens de homens e mulheres na composição populacional nos dois censos (2000 e 2010), elabore dois gráficos de *pizza* e compare-os. Houve alguma mudança significativa nesses 10 anos? Para detalhar mais sua análise, faça gráficos em que as fatias sejam divididas entre a população urbana e a rural. O que essa análise poderia mostrar? Faça os gráficos em tamanho grande (por exemplo, em folhas de cartolina) para que possam ser exibidos em uma apresentação para a classe ou em murais. Use cores bem contrastantes para distinguir as "fatias da *pizza*".

Pirâmides de idade

O desafio agora é elaborar duas pirâmides etárias para a população brasileira, uma relativa aos dados censitários de 2000 e a outra, aos de 2010. Para isso, baseie-se nas pirâmides etárias apresentadas neste capítulo. Sugerimos que você use as faixas etárias apresentadas na tabela (0 a 4, 5 a 9, 10 a 14 e assim por diante), para homens e mulheres. Consulte o professor se tiver dúvidas quanto aos cálculos necessários para converter os números da tabela em barras de tamanhos proporcionais. Uma vez prontas, analise cuidadosamente as pirâmides e discuta-as com os colegas e o professor. Nos 10 anos entre um censo e outro, houve alguma alteração significativa nas composições etárias masculina e feminina da população brasileira?

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFPA) As populações tendem a crescer indefinidamente, mas, em condições naturais, são limitadas por um conjunto de fatores denominado resistência do meio. Sobre esse assunto, é correto afirmar: 1. e

a) As taxas de imigração e emigração de indivíduos são fatores bióticos que garantem o crescimento exponencial de uma população.

b) A resistência do meio só atua nas populações que não possuem os inimigos naturais.

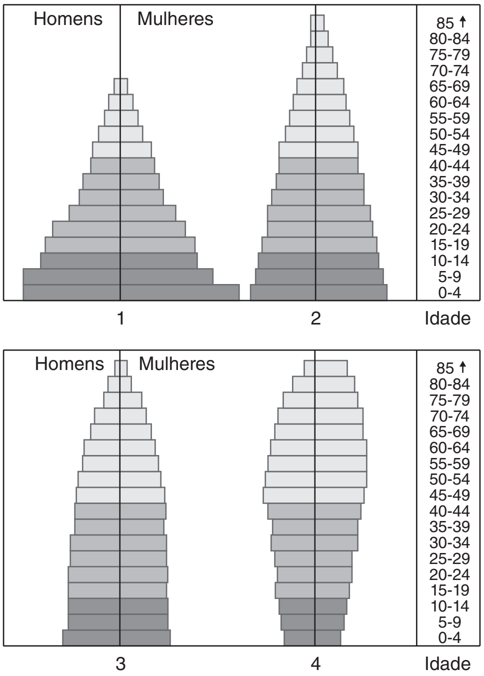
c) O potencial biótico de uma população limita a resistência do meio.

d) A densidade populacional não afeta as taxas de crescimento de uma população natural.

e) À medida que a população cresce, a resistência do meio tende a aumentar.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

2. (Unifor-CE) Analise os quatro diagramas, a seguir representados, mostrando a estrutura etária das populações humanas de quatro países diferentes.



(Adaptado de C. F. Starr, R. Taggart. *Biology*. 11. ed. Austrália: Thomson, 2006. p. 815.)

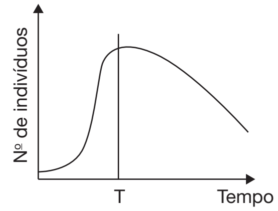
Sobre eles fizeram-se as seguintes afirmações:

I. Os diagramas apresentam exemplos de disparidade demográfica nos diferentes países.
II. As taxas de crescimento populacional nos países 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, rápida, lenta, zero e negativa.
III. Se cada casal em idade reprodutiva da população 1 decidir ter apenas um filho, a taxa de crescimento populacional será imediatamente revertida.

Está correto o que se afirmou em 2. e

a) I somente.
b) II somente.
c) III somente.
d) I e II somente.
e) I, II e III.

3. (Fuvest-SP) Uma pequena quantidade da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi inoculada em um tubo de ensaio, contendo meio apropriado. O desenvolvimento dessa cultura está representado no gráfico.



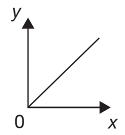
Para explicar o comportamento da população de leveduras, após o tempo T, foram levantadas três hipóteses:

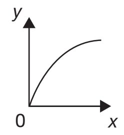
1. A cultura foi contaminada por outro tipo de microrganismo originando competição, pois o esperado seria o crescimento contínuo da população de leveduras.
2. O aumento no número de indivíduos provocou diminuição do alimento disponível, afetando a sobrevivência.
3. O acúmulo dos produtos excretados alterou a composição química do meio, causando a morte das leveduras.

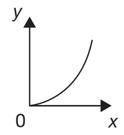
Entre as três hipóteses, podemos considerar plausível(eis) apenas 3. e

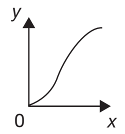
a) 1.
b) 2.
c) 3.
d) 1 e 2.
e) 2 e 3.

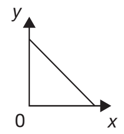
4. (PUC-Campinas-SP) Nos gráficos a seguir, a variável tempo está indicada no eixo *x* e o número de drosófilas, no eixo *y*. Qual das alternativas corresponde ao gráfico que representa corretamente o crescimento de uma população de drosófilas mantidas em meio de cultura adequado, sem restrições de nutrição, aeração e espaço? 4. c

a)


b)


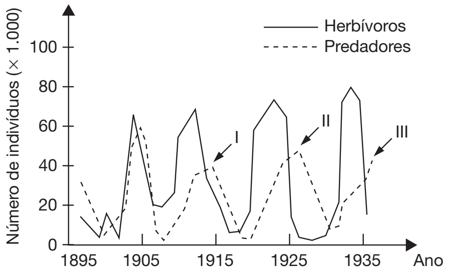
c)


d)


e)


Questão discursiva

5. (Fuvest-SP) O gráfico a seguir representa o crescimento de uma população de herbívoros e da população de seus predadores.



a) Pela análise do gráfico, como se explica o elevado número de predadores nos pontos I, II e III? Justifique sua resposta.
b) Se, a partir de 1935, os predadores tivessem sido retirados da região, o que se esperaria que acontecesse com a população de herbívoros? Justifique sua resposta.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Capítulo 10 Relações ecológicas

PATRICK ENDRES/DESIGN PICS/ GETTY IMAGES

Predadores, como os lobos, sofreram perseguição no passado e suas populações foram quase extintas. Hoje, no entanto, os cientistas reconhecem o importante papel dos grandes predadores nas teias alimentares. Na fotografia, lobos (*Canis lupus*) tentam atacar um alce (*Alces alces*) recém-nascido (Parque Nacional Denali, EUA, 2010). O lobo mede cerca de 1,5 m de comprimento e o alce 2 m de altura, ambos em fase adulta.

Novas razões para amar os superpredadores

De tempos em tempos, eles voltam a ser astros de livros e filmes. Despertam nas pessoas sentimentos de temor e admiração. Estão no topo da cadeia alimentar: eles são os superpredadores!

Tigres, leões, leopardos e lobos; tubarões de olhos frios e assassinos; estes são alguns dos predadores que escritores e cineastas mais utilizam para estimular nossa imaginação, apelando talvez para sentimentos ancestrais, da época em que os antepassados dos seres humanos viviam nas florestas e savanas povoadas por grandes carnívoros.

Agora, os grandes predadores estão de volta à cena, mas em artigos científicos que apontam o impacto ambiental causado pela crescente redução de suas populações. Um estudo internacional publicado recentemente pela revista científica *Science*[1] indicou o acentuado declínio nas populações de grandes predadores. De acordo com o artigo, a perda de espécies no topo da cadeia alimentar, devido à ação humana, pode produzir grande impacto nos ecossistemas terrestres.

O estudo mostra também que a diminuição das populações de predadores é muito maior que as estimativas anteriores indicavam e afeta diversos outros processos ecológicos, num efeito que os cientistas chamam de "cascata trófica", no qual as perdas ocorridas no topo das cadeias alimentares causam forte impacto em muitas outras espécies de animais e de plantas. De acordo com a Agência Fapesp[2], William Ripple, da Universidade Estadual do Oregon, um dos autores do estudo, afirmou: "Temos agora evidências extensivas de que os grandes predadores são altamente importantes na função da natureza, dos oceanos mais profundos às montanhas mais altas, dos trópicos ao Ártico".

Entre os exemplos citados no artigo, a remoção dos lobos no Parque Nacional Yellowstone, nos Estados Unidos, levou à rápida alteração na população e no comportamento dos alces, que passaram a se alimentar em locais antes não frequentados, onde podiam ser atacados por lobos. Com isso, o crescimento de certos arbustos e gramíneas diminuiu, o que resultou numa menor disponibilidade de alimentos para os castores, provocando redução de sua população. A reintrodução de lobos no parque, no entanto, possibilitou a recuperação do ecossistema.

---

[1] ESTES, J. A. e cols. Trophic Downgrading of Planet Earth. *Science*, v. 333, n. 6.040, p. 301-306, 15 jul. 2011. (DOI:10.1126/science.1205106). O artigo pode ser lido por assinantes da *Science* em: <www.sciencemag.org>.

[2] *A falta dos grandes predadores*, Agência Fapesp, 19 jul. 2011. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/14195>. Acesso em: mar. 2016.

O artigo afirma que o declínio dos superpredadores afeta os mais variados aspectos do ecossistema global, assim como o clima, o número de hábitats, a poluição, a fixação de carbono e até mesmo a propagação de doenças. Por muito tempo pensou-se que os grandes predadores, no topo da pirâmide trófica, pouco influenciavam as espécies dos níveis tróficos inferiores. Os autores do estudo reiteram que essa é uma compreensão fundamentalmente equivocada da Ecologia.

A importância do assunto

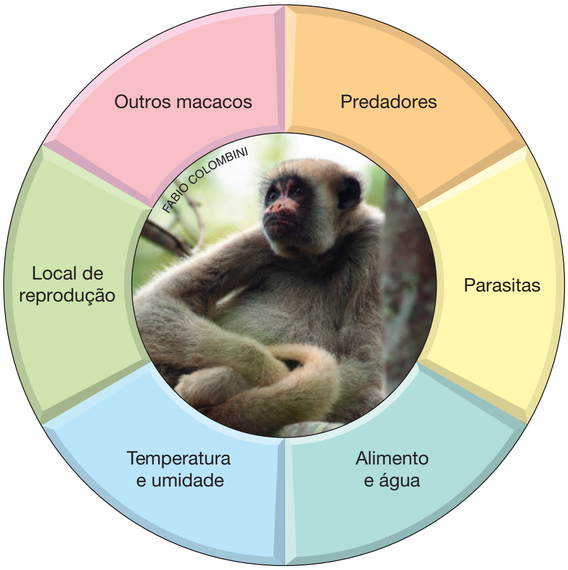
As comunidades de seres vivos são constituídas por populações de diferentes espécies, que se relacionam de diversas maneiras entre si e com o ambiente. Certas espécies alimentam-se de outras; algumas competem entre si; há também aquelas que convivem harmoniosamente, trocando benefícios. A vida, inclusive a nossa, depende precisamente da variedade dessas relações estabelecidas passo a passo ao longo do processo evolutivo.

Neste capítulo trataremos dos variados tipos de relação entre os seres vivos. Conhecer as relações que as populações de seres vivos mantêm entre si e com o ambiente é dar um passo importante para preservá-las, em benefício de toda a humanidade.

10.1 Hábitat e nicho ecológico

O local em que vive determinada espécie ou comunidade biológica, incluídas as condições ambientais, constitui seu **hábitat**. Por exemplo, quando dizemos que certa espécie de peixe vive em riachos de água fria e bem oxigenada, ou que uma espécie de macaco vive na copa das árvores de uma floresta tropical, estamos nos referindo aos hábitats dessas espécies.

Cada espécie de ser vivo apresenta um modo de vida único e peculiar no hábitat, representado por atividades que vão desde os tipos de alimento que utiliza até as condições de reprodução, moradia, hábitos, inimigos naturais, estratégias de sobrevivência etc. Esse conjunto de atividades que a espécie realiza no hábitat constitui seu **nicho ecológico**. (Fig. 10.1)



FABIO COLOMBINI

ILUSTRAÇÃO: ADILSON SECCO

Figura 10.1 O nicho ecológico designa a posição funcional de um organismo em seu ambiente, compreendendo seu hábitat, suas atividades e os recursos que ele obtém, ou seja, todas as ações típicas de uma espécie no ambiente em que vive. Na fotografia, um mono-carvoeiro (*Brachyteles hypoxanthus*), que pode chegar a 80 cm de comprimento, desconsiderando o tamanho da cauda.

O princípio da exclusão competitiva de Gause

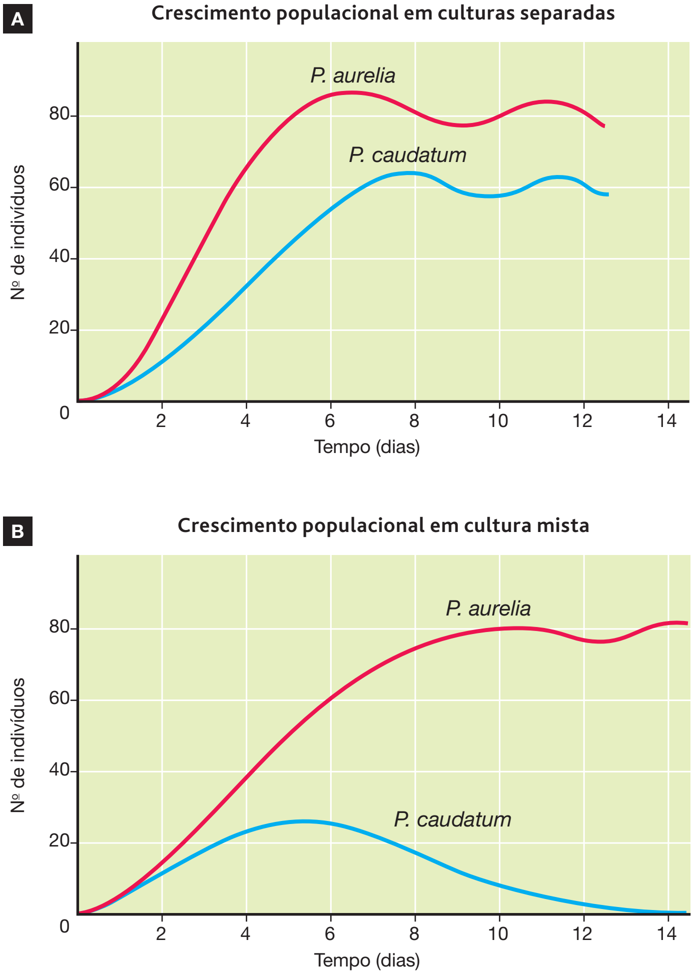
Imagine que duas espécies de uma comunidade executem atividades semelhantes no hábitat. Por exemplo, gafanhotos e roedores que vivem em um campo comem capim; ou plantas de duas espécies que vivem próximas têm raízes na mesma região do solo. O que se pode esperar nesses casos?

A conclusão é que poderá haver competição entre essas espécies, principalmente se os recursos disputados forem escassos. Em um experimento clássico, o cientista russo Georgyi F. Gause (1910-1986) criou, em um mesmo tubo de cultivo, paramécios (protozoários) de duas espécies: *Paramecium aurelia* e *Paramecium caudatum*. Gause verificou que a competição entre as duas espécies era tão intensa que levava *P. caudatum* à extinção. (Fig. 10.2)

Gause notou, entretanto, que *P. caudatum* podia conviver perfeitamente no mesmo tubo de cultivo com outra espécie de paramécio, *Paramecium bursaria*. Ele concluiu que os nichos ecológicos desses paramécios eram distintos o suficiente para evitar uma competição mais intensa, que poderia levar à extinção de uma ou outra espécie. Segundo Gause, a convivência é possível porque as duas espécies exploram diferentes nichos ecológicos, embora se encontrem no mesmo tubo de cultivo: *P. caudatum* vive livre no meio líquido, enquanto *P. bursaria* vive aderido às paredes do tubo.

Se duas espécies têm nichos ecológicos muito semelhantes, pensou Gause, elas não conseguirão conviver em um mesmo hábitat por causa da severa competição que se estabelecerá entre elas: uma espécie tenderá a excluir a outra. Essa premissa ficou conhecida como **princípio da exclusão competitiva** ou **princípio de Gause**.

Diversos estudos dão suporte às conclusões de Gause. Por exemplo, os cientistas se perguntavam por que duas espécies de cormorões (cormorão-negro e cormorão-de-poupa), aves marinhas com cerca de 90 cm de comprimento que fazem ninhos nas mesmas regiões da Inglaterra e se alimentam nas mesmas águas, conviviam perfeitamente no mesmo hábitat. Estudos mostraram que o cormorão-negro (*Phalacrocorax carbo*) mergulha mais profundamente no mar, alimentando-se de peixes e camarões, enquanto o cormorão-de-poupa (*Phalacrocorax aristotelis*) pesca em águas mais superficiais, alimentando-se de pequenos organismos do plâncton. Essas espécies conseguem compartilhar o mesmo hábitat porque seus nichos ecológicos são suficientemente distintos: no caso, elas não competem por alimento, um dos principais recursos que afetam o crescimento populacional.


A Crescimento populacional em culturas separadas

B Crescimento populacional em cultura mista

Figura 10.2 Gráficos de crescimento das espécies *Paramecium caudatum* e *Paramecium aurelia*. **A.** Curvas obtidas quando as duas espécies foram cultivadas separadamente. **B.** Curvas obtidas quando as duas espécies foram cultivadas juntas, no mesmo frasco. Gause concluiu que a diferença mostrada nos gráficos resulta da competição entre as duas espécies. (Elaborado com base em Dajoz, R., 1978.)

10.2 Relações ecológicas intraespecíficas

Em uma comunidade biológica, cada organismo mantém relações tanto com seres de sua própria espécie quanto com os de outras. Essas interações, genericamente denominadas **relações ecológicas**, podem ser classificadas em **relações intraespecíficas**, quando ocorrem entre indivíduos de mesma espécie, e **relações interespecíficas**, quando ocorrem entre indivíduos de espécies diferentes.

Organismos de mesma espécie, por terem as mesmas necessidades fundamentais, quase sempre disputam recursos do meio, fenômeno denominado competição intraespecífica. Há situações, entretanto, em que eles se auxiliam mutuamente, trocando benefícios, o que se denomina cooperação intraespecífica.

ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Competição intraespecífica

Competição intraespecífica é a disputa entre indivíduos de mesma espécie por um ou mais recursos do ambiente. Dependendo da espécie, a competição pode ser por água, alimento, luz, locais para construir ninhos, parceiros para reprodução etc.

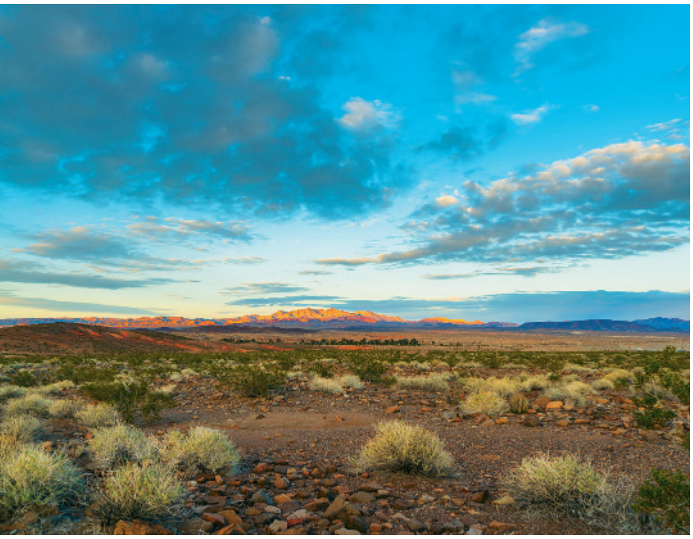

GARY WEATHERS/TETRA/GLOW IMAGES

Figura 10.3 A competição por água entre plantas do deserto leva à distribuição espaçada dos indivíduos da população. Na fotografia, deserto com plantas esparsas (Nevada, EUA, 2014).

Além da luta física por alimento ou por parceiros de reprodução, a competição também se manifesta de outras maneiras. Por exemplo, se um animal é muito eficiente na obtenção de alimento, ele tende a levar vantagem competitiva sobre outro menos eficiente, sobretudo se o alimento for escasso. Plantas com sistemas radiculares desenvolvidos e eficientes, em determinado tipo de ambiente, podem levar vantagem sobre outras plantas na competição por água, por nutrientes disponíveis no solo e por locais onde a luminosidade é mais adequada. (Fig. 10.3)

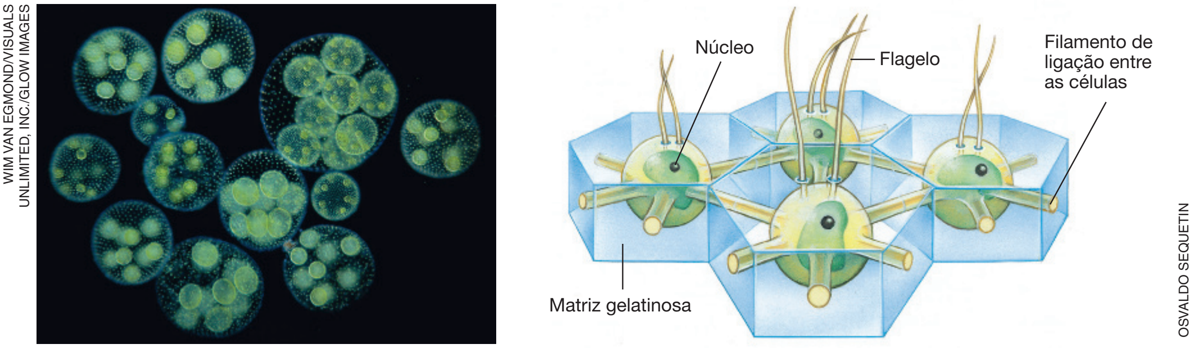
Cooperação intraespecífica

Em certas espécies, os indivíduos apresentam uma relação cooperativa denominada **cooperação intraespecífica**. A cooperação desempenha papel importante no sucesso evolutivo de muitas espécies. Entre as relações cooperativas intraespecíficas destacam-se o cuidado com a prole e a formação de grupos sociais. A cooperação intraespecífica manifesta-se claramente nas colônias e nas sociedades, que estudaremos a seguir.

Colônias

Do ponto de vista biológico, **colônias** são grupos de indivíduos de mesma espécie, fisicamente unidos, que interagem de forma mutuamente vantajosa, dividindo funções ou tarefas. As colônias podem variar em níveis de complexidade e no grau de divisão de tarefas entre os indivíduos.

Algumas colônias são constituídas por indivíduos morfológica e funcionalmente semelhantes, sendo por isso denominadas **colônias isomorfas** (do grego *isos*, igual, semelhante, e *morpho*, forma). Um exemplo desse tipo de colônia é encontrado na alga de água doce *Volvox* sp., que pode reunir mais de 50.000 indivíduos unicelulares e biflagelados dispostos lado a lado, formando uma esfera oca. Dentro da esfera podem formar-se colônias menores, que ficam contidas por certo tempo na "colônia-mãe". (Fig. 10.4)


WIM VAN EGMOND/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

OSWALDO SEQUETIN

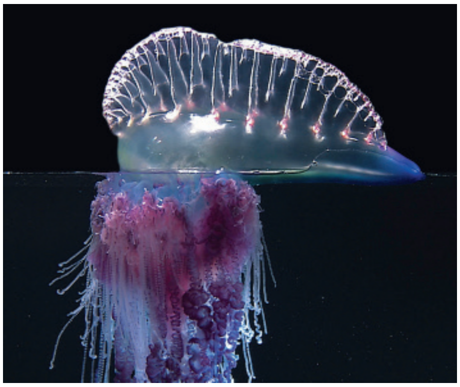
Figura 10.4 Fotomicrografia de colônias da alga verde *Volvox aureus* (Microscópio fotônico; aumento ≈ 12×.) Ao lado, representação esquemática dos indivíduos biflagelados que formam a porção periférica da colônia. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Outro exemplo de colônia isomorfa é encontrado nos corais (cnidários). As pequenas anêmonas que constituem o coral constroem um esqueleto calcário compartilhado por centenas, milhares ou milhões de indivíduos muito semelhantes. Na Austrália, as colônias de corais formam um imenso recife chamado de Grande Barreira de Corais, com mais de 2.000 quilômetros de extensão.

Em certos casos, os indivíduos de uma colônia diferenciam-se morfológica e fisiologicamente, realizando funções bem distintas; fala-se, então, em **colônia heteromorfa** (do grego *heteros*, diferente). Um exemplo é a colônia de cnidários marinhos *Physalia physalis*, popularmente conhecida como caravela-portuguesa. Na colônia, um dos indivíduos diferencia-se em flutuador, formando uma bolsa cheia de gás cuja função é manter a colônia na superfície marinha. Outros indivíduos da colônia têm boca e cavidade digestória, sendo responsáveis pela alimentação. Outros, por sua vez, são alongados e ricos em células urticantes, formando longos tentáculos, que atuam na captura de presas e na proteção da colônia; há também indivíduos responsáveis pela reprodução, os gonozoides. Na caravela-portuguesa, os indivíduos da colônia apresentam tal especialização e divisão de funções que, em conjunto, acabam se comportando como órgãos de um único organismo. (Fig. 10.5)

Sociedades

Sociedades são agrupamentos de organismos de mesma espécie em que os indivíduos manifestam algum grau de cooperação, de comunicação e de divisão de trabalho, conservando, porém, relativa independência e mobilidade. É isso o que distingue sociedade de colônia, na qual os indivíduos são fisicamente unidos. Diversas espécies, inclusive a nossa, vivem em sociedade.


WHOI/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

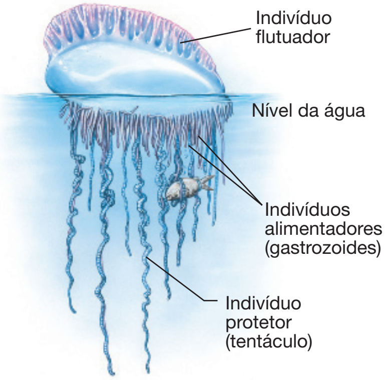

Indivíduo flutuador
Nível da água
Indivíduos alimentadores (gastrozoides)
Indivíduo protetor (tentáculo)
OSVALDO SEQUETIN

Figura 10.5 Cnidário colonial *Physalia physalis*, que é constituído por indivíduos altamente integrados, como mostra a ilustração. Na fotografia, o animal que atua como flutuador mede cerca de 10 cm de comprimento. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.).

10.3 Relações ecológicas interespecíficas

Nas comunidades, há grande variedade de relações ecológicas entre espécies diferentes, desde interações em que indivíduos de uma espécie alimentam-se dos de outra até a troca de benefícios entre indivíduos de espécies diferentes.

Os especialistas costumam classificar as relações ecológicas interespecíficas em alguns tipos básicos: competição, interações tróficas, mutualismo, comensalismo e inquilinismo. Essas relações são tratadas a seguir e resumidas na Tabela 10.1, na página 237.

Competição interespecífica

Como vimos, Gause observou que, quando duas espécies de uma comunidade disputam os mesmos recursos do ambiente, seus nichos ecológicos se "sobrepõem" parcialmente e ocorre **competição interespecífica**. Quanto mais os nichos ecológicos das espécies se assemelham, ou seja, quanto mais sobrepostos eles são, mais intensa é a competição; isso pode levar uma das espécies à extinção ou forçá-la a migrar em busca de uma área disponível, livre de espécies competidoras.

Interações tróficas

Herbivoria

Herbivoria é a relação que se estabelece entre plantas e animais que se alimentam delas. Certos animais comem apenas partes das plantas, não chegando a matá-las. É o que ocorre, por exemplo, com mamíferos que se alimentam de grama e com larvas de insetos que comem folhas. Quando os animais se alimentam de sementes, porém, a planta é morta ainda na fase embrionária. Em qualquer dessas situações, do ponto de vista individual, há prejuízo para as plantas e benefício para os animais que as consomem.

A herbivoria é uma das mais importantes relações ecológicas da natureza, uma vez que, ao comer plantas, os animais assimilam a energia captada da luz solar, que pode então ser transferida para outros níveis tróficos das cadeias alimentares (relembre no capítulo 8).

Predação

Predação ou **predatismo** é a relação em que uma espécie predadora mata e come indivíduos de outra espécie, sua **presa**. Do ponto de vista individual, a espécie predadora beneficia-se, enquanto a espécie predada é prejudicada. Do ponto de vista ecológico, entretanto, a predação é um importante mecanismo regulador da densidade populacional, tanto de presas como de predadores. A estreita correlação entre as flutuações no tamanho das populações de predadores e presas é importante para a sobrevivência de ambas (relembre o exemplo da flutuação populacional de lebres e linces do Ártico, no capítulo 9).

Amplie seus conhecimentos

Um exemplo do papel da predação no equilíbrio ambiental

A importância da predação como mecanismo regulador das populações naturais foi bem observada no início do século XX, quando se proibiu a caça ao veado *Odocoileus hemionus* no Planalto de Kaibab, nos Estados Unidos, ao mesmo tempo que se estimulou a perseguição aos seus predadores naturais – pumas, lobos e coiotes. Como consequência dessas medidas, a população de veados aumentou rapidamente: em apenas 21 anos, passou de 4 mil para 100 mil animais. Os campos de pastagem, porém, eram incapazes de suportar mais que 30 mil animais. Quando essa capacidade de suporte foi ultrapassada, os veados começaram a morrer de fome e doenças, e sua população diminuiu bruscamente.

Quinze anos após ter atingido o recorde de 100 mil indivíduos, a população de veados reduziu-se a menos de 10 mil animais. O que aconteceu foi que os veados famintos comeram as plantas de capim até as raízes, além de pisotear excessivamente o solo, afetando a capacidade de recuperação das pastagens. Por isso, o capim não voltou a brotar como antes, mesmo depois da redução drástica da população de veados.

Crescimento populacional

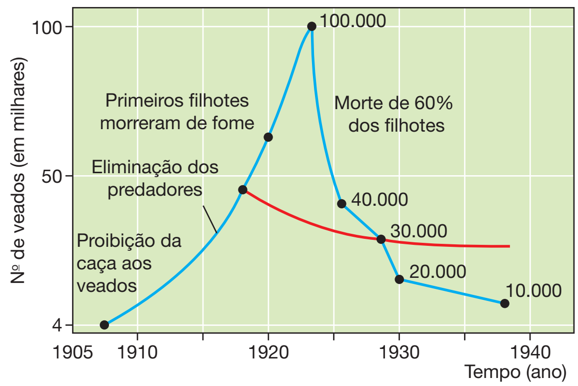


ILUSTRAÇÃO: ADILSON SECCO

No gráfico, a linha azul mostra o crescimento da população do veado *Odocoileus hemionus* no Planalto de Kaibab, no Arizona, EUA, após proibição da caça e campanha de combate a seus predadores naturais. Se estes não tivessem sido eliminados, a expectativa era de que o tamanho da população de veados seguisse a linha vermelha. (Elaborado com base em Dajoz, R., 1978.)

JAMES HAGER/ROBERT HARDING/GLOW IMAGES

Veado (*Odocoileus hemionus*), que tem cerca de 1,6 m de comprimento.

DLILLC/CORBIS/LATINSTOCK

Lobo (*Canis lupus*), que possui cerca de 1,5 m de comprimento.

JSPIX/IMAGEBROKER/GLOW IMAGES

Puma (*Puma concolor*), felino que tem aproximadamente 2,1 m de comprimento.

KAREN BLEIER/AFP

Coiote (*Canis latrans*), que chega a cerca de 80 cm de comprimento.

Parasitismo

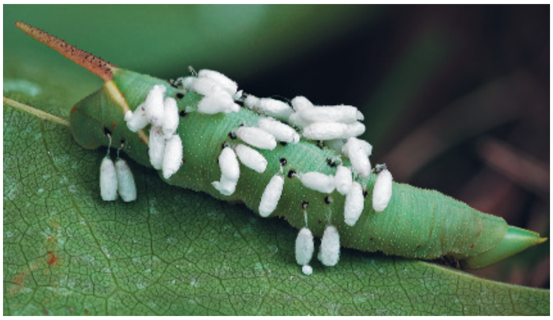
Parasitismo é uma relação ecológica em que uma espécie **parasita** associa-se a outra, a espécie **hospedeira**, causando-lhe prejuízos por se alimentar à sua custa. Em geral, as espécies parasitas e hospedeiras estão bem adaptadas umas às outras, de modo que a relação causa prejuízos relativamente pequenos ao parasitado. Basta pensar que, se um parasita matar seu hospedeiro, ele também morrerá; portanto, a tendência natural é que a relação parasitária se torne equilibrada ao longo do tempo, com o parasita adaptando-se ao hospedeiro e vice-versa, fenômeno denominado **coadaptação**.

Organismos parasitas podem viver na superfície externa do hospedeiro, sendo chamados **ectoparasitas** (do grego *ectos*, fora), ou no interior do hospedeiro, sendo denominados **endoparasitas** (do grego *endos*, dentro). Exemplos de ectoparasitas são os piolhos e os carrapatos, e, de endoparasitas, são as lombrigas, as solitárias, certas bactérias e os vírus.

Parasitoidismo: parasitismo ou predação de longo prazo?

Um caso particular de parasitismo é o **parasitoidismo**, termo utilizado para designar a relação em que um organismo vive boa parte de sua vida em um hospedeiro, parasitando-o. Em determinado momento, o hospedeiro é morto e consumido, como na predação.

Um exemplo bem conhecido de parasitoide são as vespas que põem os ovos dentro de hospedeiros como aranhas e larvas de insetos. Após a eclosão dos ovos, as larvas da vespa passam a devorar lentamente os tecidos corporais vivos do hospedeiro, até que ele seja consumido totalmente. Ao final do processo, as larvas transformam-se em vespas adultas. (Fig. 10.6)



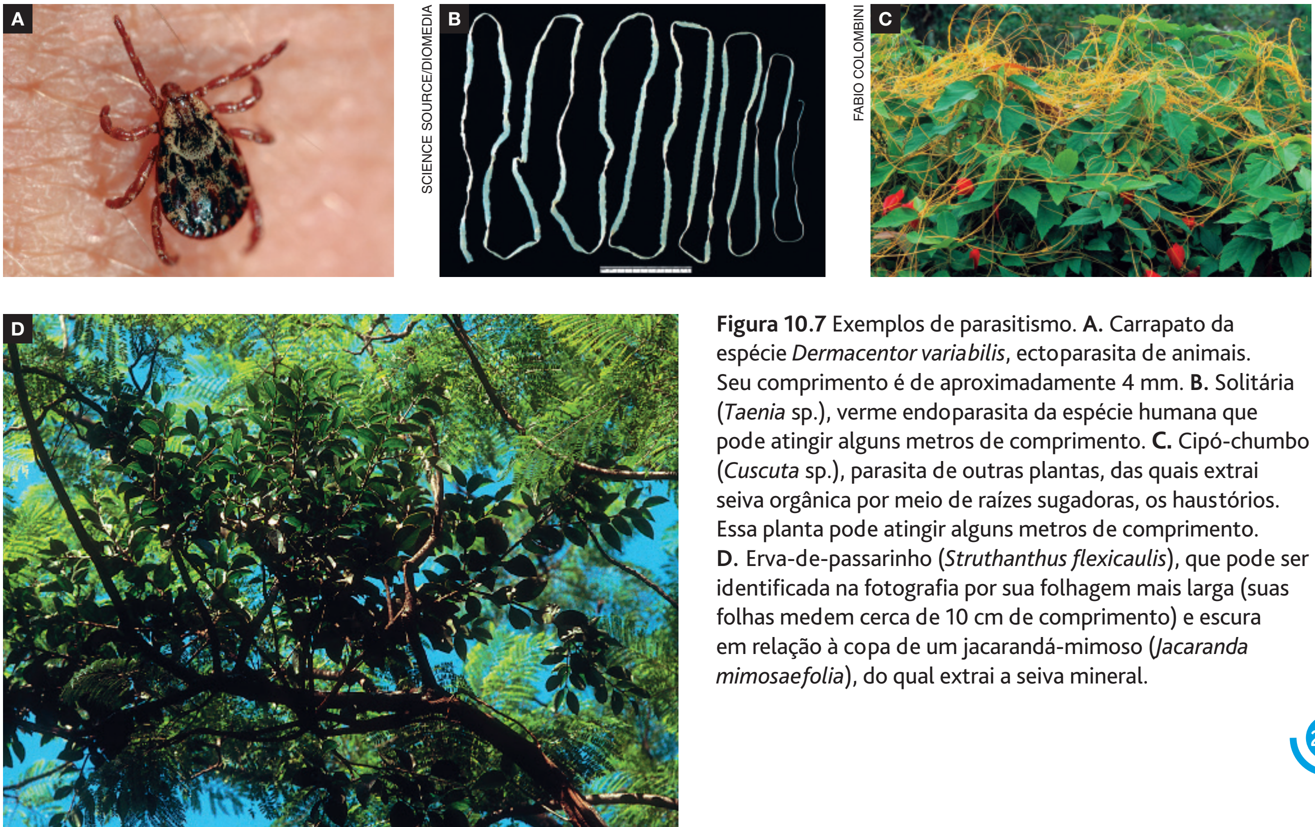
ARQUIVO DO AUTOR

Figura 10.6 Exemplo de parasitoidismo: pupas de vespa se desenvolvendo na superfície do corpo de uma lagarta. A lagarta apresenta cerca de 15 cm de comprimento.

Plantas parasitas

Há plantas que parasitam outras plantas. Um exemplo é o cipó-chumbo, uma planta parasita de cor amarela, sem folhas nem clorofila e com aparência de fios de ovos, que cresce sobre outras plantas. Com raízes especializadas, o cipó-chumbo penetra no floema da planta hospedeira e dali extrai seiva orgânica.

Outra planta parasita de plantas é a erva-de-passarinho. Ela tem folhas clorofiladas e produz moléculas orgânicas por fotossíntese, retirando da planta hospedeira apenas água e sais minerais dos vasos lenhosos. Por extrair da hospedeira apenas substâncias inorgânicas, a erva-de-passarinho é considerada pelos botânicos uma **hemiparasita** (do grego *hemi*, metade). (Fig. 10.7)



BILL FRYMIRE/LATINSTOCK

SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

FABIO COLOMBINI

FABIO COLOMBINI

Figura 10.7 Exemplos de parasitismo. **A.** Carrapato da espécie *Dermacentor variabilis*, ectoparasita de animais. Seu comprimento é de aproximadamente 4 mm. **B.** Solitária (*Taenia* sp.), verme endoparasita da espécie humana que pode atingir alguns metros de comprimento. **C.** Cipó-chumbo (*Cuscuta* sp.), parasita de outras plantas, das quais extrai seiva orgânica por meio de raízes sugadoras, os haustórios. Essa planta pode atingir alguns metros de comprimento. **D.** Erva-de-passarinho (*Struthanthus flexicaulis*), que pode ser identificada na fotografia por sua folhagem mais larga (suas folhas medem cerca de 10 cm de comprimento) e escura em relação à copa de um jacarandá-mimoso (*Jacaranda mimosaefolia*), do qual extrai a seiva mineral.

Mutualismo

Mutualismo é uma relação ecológica em que ambas as espécies em interação obtêm benefícios. Os biólogos distinguem dois tipos de mutualismo: o facultativo e o obrigatório.

O **mutualismo facultativo**, também chamado de **protocooperação**, é uma relação ecológica em que as espécies associadas trocam benefícios, mas também podem viver sozinhas. Um exemplo é a relação entre crustáceos do gênero *Pagurus*, os caranguejos-eremitas, e algumas espécies de anêmona-do-mar (cnidários). Esses animais não vivem necessariamente juntos, mas é frequente encontrá-los em associação, o que é vantajoso para ambos.

O caranguejo-eremita ocupa conchas vazias de caramujos, nas quais protege seu abdome delicado, pois, ao contrário de outros caranguejos, o eremita não tem carapaça rígida nessa região do corpo. Uma vez instalado em sua concha-moradia, o caranguejo-eremita a arrasta consigo aonde quer que vá, abandonando-a apenas ao trocá-la por outra maior. Sobre as conchas ocupadas por certas espécies de eremita é frequente encontrar uma ou mais anêmonas-do-mar; esses cnidários beneficiam-se da associação com o eremita por ganharem mobilidade e aproveitarem suas eventuais sobras de alimento. Já o caranguejo se beneficia da capacidade defensiva das anêmonas-do-mar, cujos tentáculos têm células urticantes, capazes de provocar queimaduras em eventuais inimigos.

Outro exemplo de protocooperação é a relação entre alguns mamíferos – capivaras, búfalos, rinocerontes etc. – e aves que comem os carrapatos que os infestam. Há vantagens tanto para o mamífero, que se livra dos incômodos ectoparasitas, quanto para o pássaro, que obtém alimento com relativa facilidade. Crocodilos também convivem cooperativamente com aves que entram em sua boca, removendo detritos e sanguessugas de suas gengivas. (Fig. 10.8)

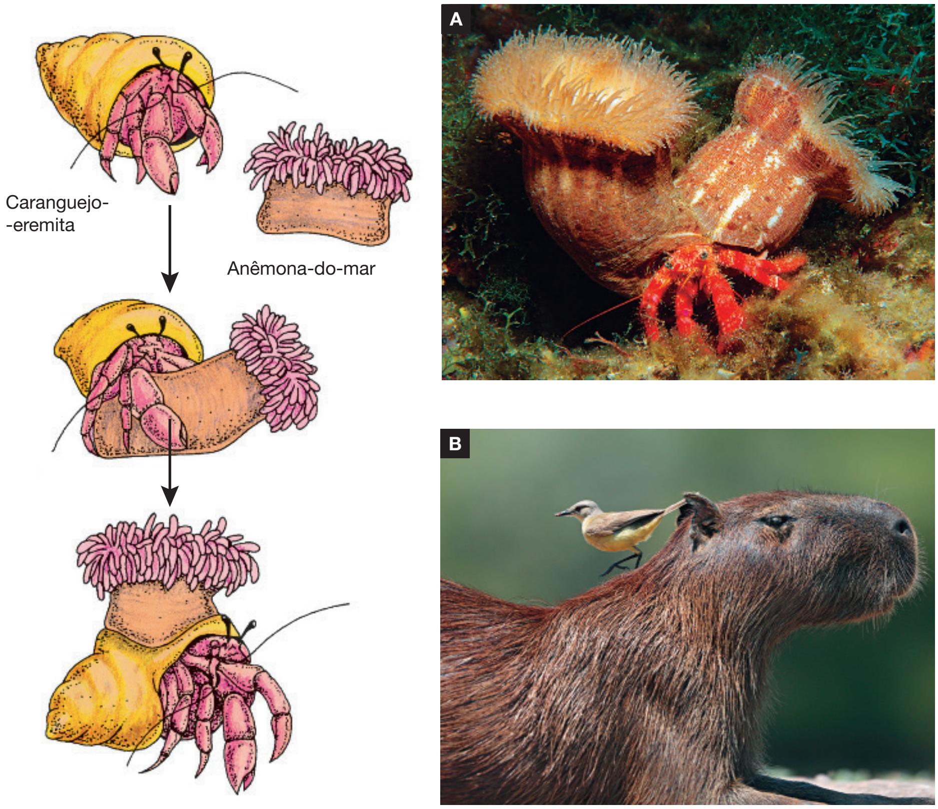


ILUSTRAÇÃO: PAULO MANZI

WOLFGANG PÖLZER/ALAMY/GLOW IMAGES

FABIO COLOMBINI

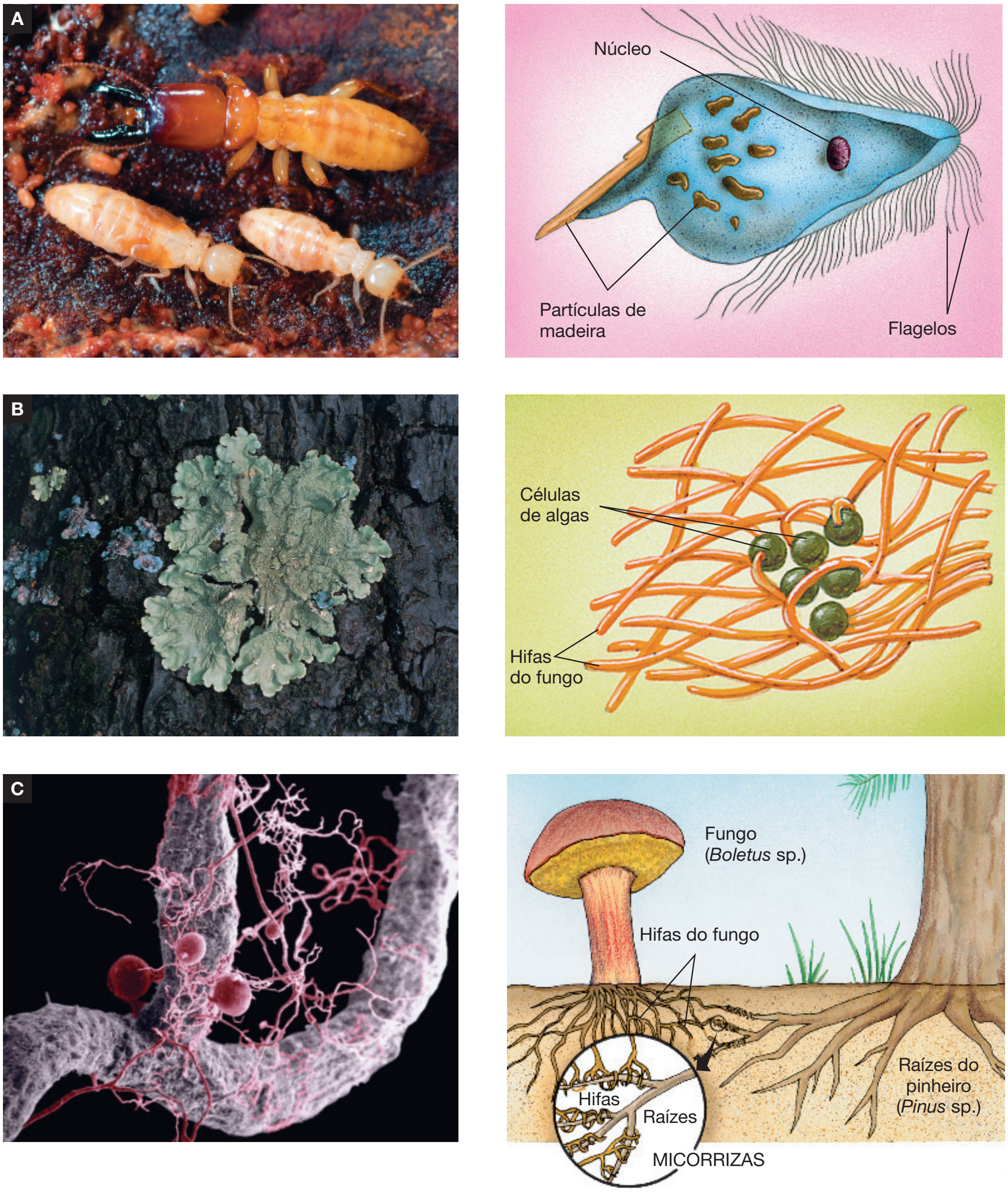
Figura 10.8 Exemplos de protocooperação. **A.** Caranguejo-eremita (*Dardanus calidus*) dentro da concha que lhe serve de abrigo, sobre a qual vivem anêmonas-do-mar (*Calliactis parasitica*). O caranguejo e a anêmona medem cerca de 12 cm e 10 cm, respectivamente. À esquerda, representação esquemática de um eremita colocando uma anêmona sobre a concha onde mora. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.) **B.** Capivara (*Hydrochoerus hydrochaeris*) com a ave suiriri-cavaleiro (*Machetornis roxisus*), que se alimenta de carrapatos. A capivara adulta pode chegar a 1,4 m de comprimento; o suiriri-cavaleiro mede cerca de 18 cm de comprimento.

Mutualismo obrigatório é um tipo de relação permanente e indispensável à sobrevivência dos indivíduos associados. Um exemplo de mutualismo obrigatório é a interação de certas espécies de cupim com microrganismos – bactérias e protozoários – que habitam o intestino desses insetos. Os cupins alimentam-se de madeira, mas são incapazes de digerir seu principal componente, a celulose. A digestão desse carboidrato é realizada pelos microrganismos que vivem exclusivamente no tubo digestivo dos cupins.

Outro exemplo de mutualismo obrigatório são os **liquens**, formados pela associação de certas espécies de algas verdes ou de bactérias fotossintetizantes com determinadas espécies de fungos.

Por meio da fotossíntese, a alga ou a bactéria produz matéria orgânica, utilizada também pelo fungo; este, por sua vez, é capaz de absorver do ambiente água e nutrientes, que seus parceiros fotossintetizantes aproveitam. O líquen sobrevive em locais onde nenhuma das duas espécies que o formam poderia sobreviver isoladamente.

Um terceiro exemplo de mutualismo obrigatório é a **micorriza** (do grego, *mycos*, fungo, e *rhizos*, raiz), associação entre determinados fungos e raízes de plantas. As hifas dos fungos penetram nas raízes, das quais obtêm carboidratos como a glicose e a sacarose. A planta, por sua vez, beneficia-se da grande capacidade do fungo de absorver água e nutrientes minerais do solo. (Fig. 10.9)



STUART WILSON/SCIENCE SOURCE/LATINSTOCK

M. GIOVANOLI/DE AGOSTINI/DIOMEDIA

MERTON BROWN/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

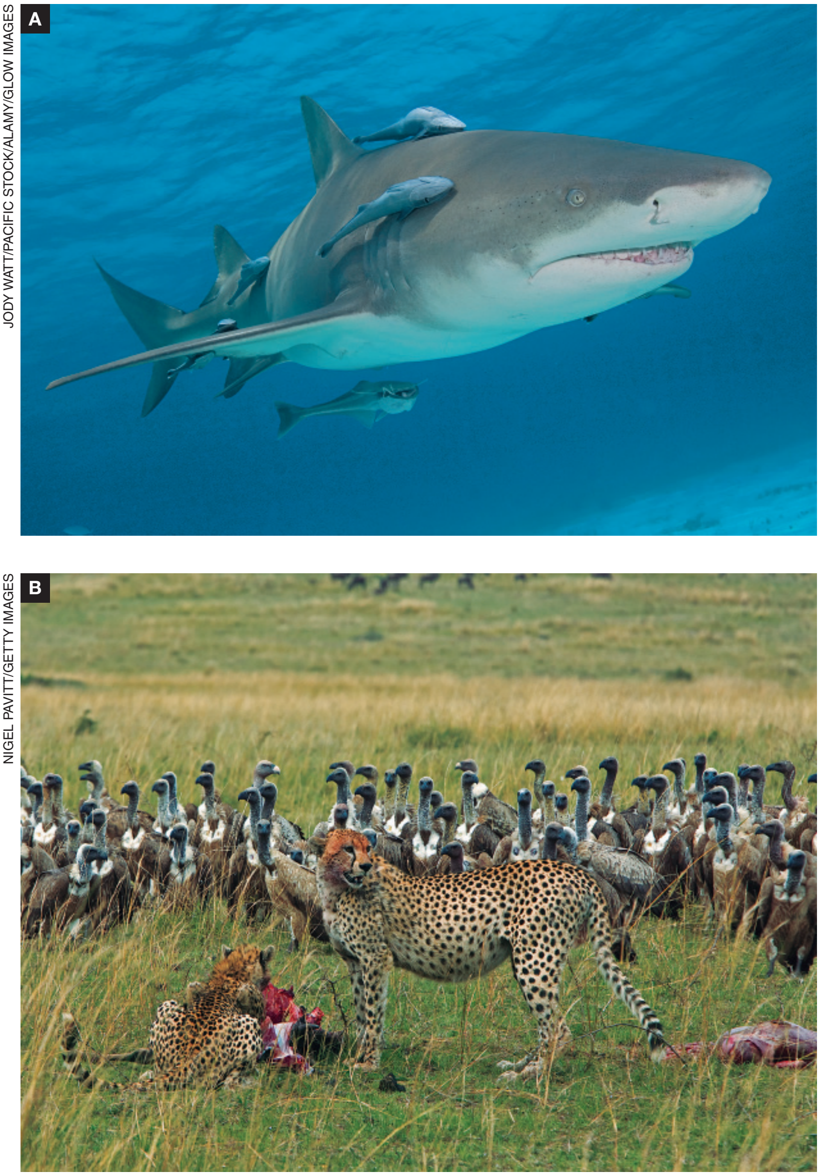
ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Figura 10.9 Exemplos de mutualismo. **A.** Certas espécies de cupim, como a da foto (*Zootermopsis angusticollis*), cujos adultos medem cerca de 1 cm de comprimento, abrigam em seu tubo digestivo bactérias e protozoários flagelados. Ao lado, representação esquemática de protozoário do gênero *Trichonympha*, que vive no intestino do cupim-de-madeira. **B.** Liquens da espécie *Lobaria scrobiculata* sobre o tronco de uma árvore. Esse líquen atinge cerca de 10 cm de diâmetro. Ao lado, representação esquemática da relação entre a alga verde e o fungo no líquen. **C.** Fotomicrografia de raízes de soja (*Glycine max*) envoltas por fungos formando micorrizas. (Microscópio eletrônico de varredura; aumento ≈ 75×; cores artificiais.) Ao lado, representação esquemática da associação de um fungo com as raízes de uma planta. Esta recebe água e sais minerais que o fungo extrai do solo; o fungo utiliza substâncias orgânicas produzidas pela planta. (Nas ilustrações, os elementos foram representados fora de proporção de tamanho entre si e com cores-fantasia.)

Comensalismo e inquilinismo

Comensalismo é o tipo de relação em que uma das espécies associadas é beneficiada, enquanto a outra não tem nem prejuízos nem benefícios. O principal recurso buscado pelo comensal, como o nome sugere, é alimento. Um exemplo conhecido de comensalismo é a associação entre a rêmora (ou peixe-piloto) e o tubarão. A rêmora possui uma estrutura dorsal aderente comparável a uma ventosa, com a qual se prende ao corpo do tubarão. Este proporciona transporte e restos de alimento para a rêmora e parece não se importar com sua presença.

A relação entre abutres e animais carnívoros é um tipo de comensalismo. Os abutres acompanham os carnívoros a distância, servindo-se dos restos desprezados da caça. (Fig. 10.10)

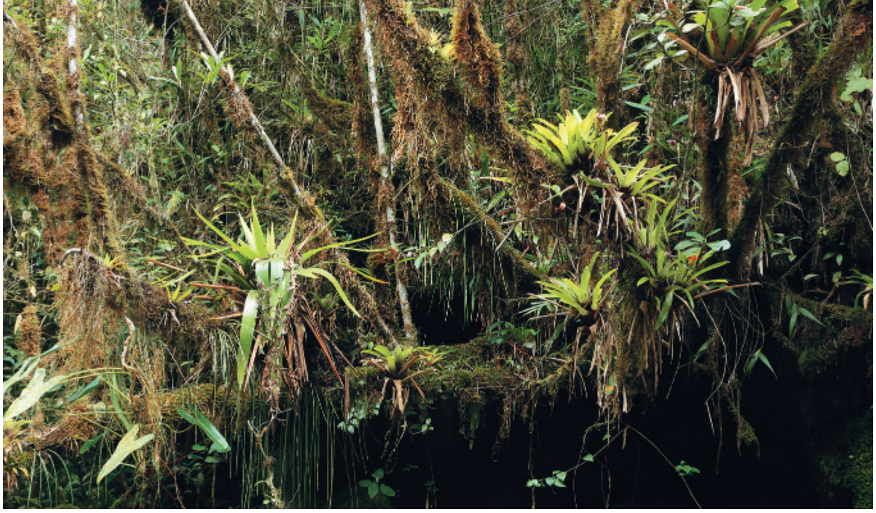


JODY WATT/PACIFIC STOCK/ALAMY/GLOW IMAGES

NIGEL PAVITT/GETTY IMAGES

Figura 10.10 Exemplos de comensalismo. **A.** Rêmoras (*Remora remora*) "pegam carona" em um tubarão-limão (*Negaprion brevirostris*). O tubarão-limão pode chegar a 3 m de comprimento, e as rêmoras, a 90 cm. **B.** Abutres-de-costas-brancas (*Gyps africanus*) são comensais habituais de felinos como os guepardos (*Acinonyx jubatus*) e outros carnívoros africanos. Os abutres e os guepardos medem, respectivamente, cerca de 80 cm e 1,3 m de comprimento.

Inquilinismo é a relação em que uma espécie "inquilina" vive sobre ou mesmo dentro de uma espécie hospedeira, sem prejudicá-la. O principal recurso buscado pelo inquilino, como o nome sugere, é abrigo e moradia. Várias espécies de orquídeas, bromélias e samambaias vivem sobre outras plantas maiores, que lhes servem de suporte. Nesses casos, as espécies inquilinas são denominadas **epífitas** (do grego *epi*, sobre, e *phytos*, planta). A vantagem das epífitas em crescer sobre plantas altas é obter maior suprimento de luz para a fotossíntese, principalmente no ambiente pouco iluminado do interior das florestas. (Fig. 10.11)



FABIO COLOMBINI

Figura 10.11 No inquilinismo das plantas epífitas sobre árvores hospedeiras, as primeiras obtêm vantagens, mas as árvores não são prejudicadas. Crescer sobre lugares mais elevados, principalmente em florestas fechadas, permite obter maior luminosidade para a realização da fotossíntese. Na fotografia, bromélias na Mata Atlântica (Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha, SP, 2014).

O conceito de simbiose

Em 1879, o biólogo alemão Heinrich Anton de Bary (1831-1888) criou o termo **simbiose** (do grego *syn*, juntos, e *bios*, vida) para designar associações entre indivíduos de espécies diferentes com consequências vantajosas ou desvantajosas para pelo menos uma das partes.

Segundo a definição original, relações como inquilinismo, comensalismo, mutualismo e parasitismo seriam casos de simbiose. No entanto, o termo simbiose tem sido utilizado muitas vezes como sinônimo de mutualismo e não raro refere-se exclusivamente a mutualismo obrigatório. Além disso, alguns autores definem simbiose como uma associação entre indivíduos de espécies diferentes, em que um vive dentro do outro ou sobre o outro. Por isso, alertamos para essas utilizações pouco criteriosas do termo simbiose.

Resumo das relações ecológicas interespecíficas

Na tabela a seguir resumimos as relações interespecíficas estudadas neste capítulo. Os efeitos da relação entre os indivíduos das espécies relacionadas são representados pelo sinal (+) quando há ganho ou vantagem, pelo sinal (−) quando há perda ou desvantagem e pelo número (0) quando não há vantagem nem desvantagem. Lembre-se de que esse critério visa apenas caracterizar a relação em termos de perdas ou ganhos individuais. Como enfatizamos no capítulo, relações como a predação, a competição e o parasitismo, em que há prejuízos para os indivíduos, podem trazer benefícios para as populações, as comunidades e os ecossistemas. (Tab. 10.1)

TABELA 10.1 TIPOS BÁSICOS DE RELAÇÕES ECOLÓGICAS INTERESPECÍFICAS

Tipos de relação	Efeitos sobre os indivíduos participantes	
	Espécie A	Espécie B
Competição	−	−
Interações tróficas	+	−
Mutualismo	+	+
Comensalismo	+	0
Inquilinismo	+	0

É importante esclarecer também que nem sempre é fácil caracterizar as relações entre os seres vivos. Na verdade, tentamos utilizar determinados critérios lógicos para facilitar o estudo, mas eles nem sempre correspondem à diversidade da natureza. Por exemplo, em certos casos é difícil estabelecer a diferença entre inquilinismo e comensalismo. Certas espécies de peixe-palhaço encontram abrigo e proteção entre os tentáculos de anêmonas-do-mar. Essa relação seria caracterizada, em princípio, como inquilinismo. Entretanto, se os peixes-palhaço se aproveitarem de restos da alimentação da anêmona, além de utilizá-la como abrigo, não seria mais apropriado classificar a relação como comensalismo?

Aproveite o exemplo do peixe-palhaço para esclarecer aos alunos que os seres vivos podem participar de diversas relações ecológicas ao mesmo tempo, podendo ser beneficiados em algumas e prejudicados em outras.

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. As interações de vários tipos que ocorrem entre os seres vivos de uma comunidade biológica são genericamente denominadas: 1. c

a) biomas.
b) comunidades clímax.
c) relações ecológicas.
d) sucessão ecológica.

2. Nicho ecológico é: 2. b

a) a parte da comunidade biológica representada por seres vivos.
b) o conjunto de relações de uma espécie no hábitat.
c) o local do biótopo em que vive a espécie.
d) o mesmo que biocenose.
e) o mesmo que hábitat.

3. O princípio da exclusão competitiva de Gause refere-se a que relação ecológica? 3. b

a) Comensalismo.
b) Competição interespecífica.
c) Competição intraespecífica.
d) Mutualismo.
e) Protocooperação.

4. “Um pequeno pássaro, conhecido por paliteiro, entra sem medo na boca do crocodilo do Rio Ganges, removendo sanguessugas e detritos das gengivas do réptil. O crocodilo não come o pássaro e parece abrir a boca propositalmente para a atuação da ave.”

De acordo com a descrição anterior, a relação ecológica entre o pássaro e o crocodilo pode ser classificada como: 4. d

a) comensalismo.
b) competição interespecífica.
c) inquilinismo.
d) mutualismo facultativo (protocooperação).
e) mutualismo obrigatório.

5. Térmitas são organismos que vivem em grandes cidadelas construídas de barro, chamadas popularmente de “cupinzeiros”. Os indivíduos de um cupinzeiro repartem funções e todos cooperam para o bem-estar do grupo. Qual das relações ecológicas melhor se aplica à associação que ocorre entre as térmitas? 5. e

a) Colônia.
b) Nicho ecológico.
c) Protocooperação.
d) Mutualismo.
e) Sociedade.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

6. Certos insetos, entre os quais se destacam abelhas e vespas, visitam flores coletando pólen e néctar, utilizados como alimento para as colmeias. Ao visitar diversas flores durante seu trabalho, os insetos transportam pólen de uma flor para outra, atuando como agentes polinizadores que auxiliam na reprodução das plantas. Certas espécies de planta são altamente adaptadas a determinadas espécies de inseto polinizador e dependem exclusivamente delas para se reproduzir. Em outras plantas, a polinização pode ser feita por diversas espécies de inseto e até mesmo pelo vento. Como você classificaria o tipo de interação entre os insetos polinizadores e as plantas por eles polinizadas? Considere, em sua análise, tanto os casos em que o agente polinizador é altamente específico para a espécie vegetal, com alta interdependência, como os casos em que não há essa especificidade.

7. As aves conhecidas como pica-paus têm a língua alongada com um gancho na ponta. Para se alimentar, eles introduzem esse órgão nas cavidades de troncos de árvores (essas cavidades são causadas por larvas de insetos brocas), retirando dali larvas que lhes servem de alimento. Sabendo que as brocas são extremamente prejudiciais à saúde das plantas, classifique o tipo de relação que existe entre:

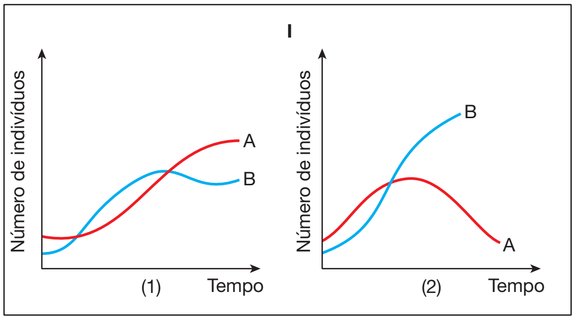
a) as brocas e as árvores onde elas vivem;
b) os pica-paus e as brocas;
c) os pica-paus e as árvores.

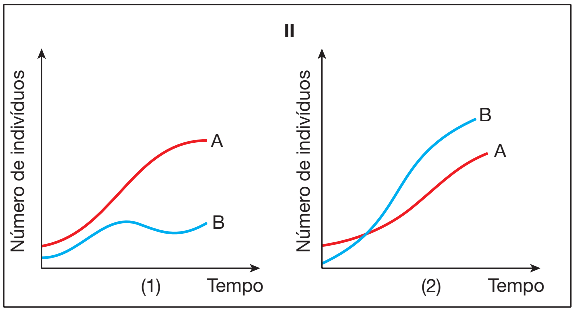
8. Certas espécies de formigas cortam folhas, levam-nas para os formigueiros e nelas cultivam fungos específicos, dos quais se alimentam. A relação entre essas formigas e fungos é altamente específica e interdependente: não poderiam viver uns sem os outros. Pesquise sobre essa relação e elabore um resumo com as informações mais relevantes.

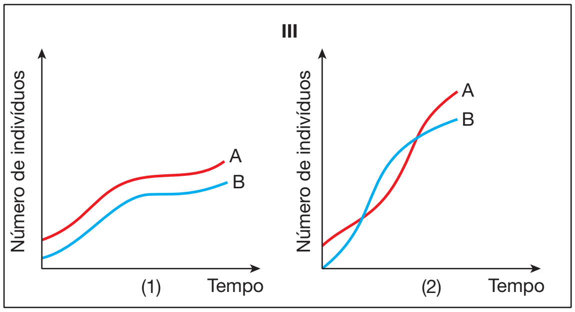
9. Algumas espécies de formigas defendem pulgões de seus predadores naturais. Esse comportamento aparentemente inusitado tem uma explicação: se devidamente estimulados, os pulgões produzem gotículas ricas em açúcares extraídos da seiva vegetal, que servem de alimento às formigas. Alguns cientistas denominam essa relação de esclavagismo, argumentando que formigas transformam pulgões em seus “escravos”. Analisando essa relação pelo aspecto da reciprocidade, como ela poderia ser classificada? Pesquise a respeito e escreva suas considerações no caderno.

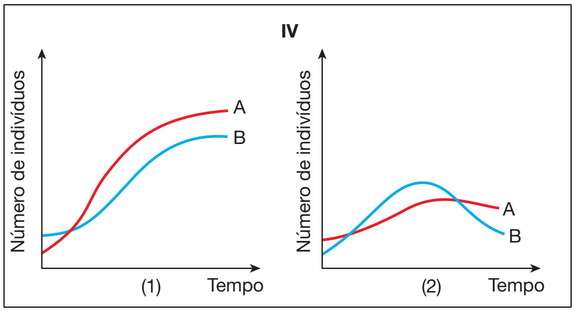
10. A linguagem matemática é útil em diversos ramos da ciência. Apresentar variáveis em forma de gráfico, por exemplo, facilita a análise e a interpretação de muitos fenômenos. A seguir, em cada um dos quadros identificados por um algarismo romano, há dois gráficos: o da esquerda (1) representa as curvas de crescimento de duas espécies quando separadas, e o da direita (2), quando elas estão juntas. Em todos os casos, as condições do meio são ótimas para as espécies.

GRÁFICOS: ADILSON SECCO









Qual dos quadros – I, II, III ou IV – corresponde a cada relação ecológica mencionada a seguir? Justifique as escolhas em frases curtas.

a) Comensalismo.
b) Predação.
c) Competição.
d) Protocooperação.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (UFC-CE) Uma espécie de anfíbio apresenta fase larval aquática e onívora e fase adulta terrestre e carnívora. Nessa frase, encontramos os conceitos de 1. e

a) teia alimentar e hábitat.
b) biocenose e pirâmide de energia.
c) teia alimentar e nicho ecológico.
d) ecossistema e biocenose.
e) hábitat e nicho ecológico.

2. (Unifesp) A raflésia é uma planta asiática que não possui clorofila e apresenta a maior flor conhecida, chegando a 1,5 metro de diâmetro. O caule e a raiz, no entanto, são muito pequenos e ficam ocultos no interior de outra planta em que a raflésia se instala, absorvendo a água e os nutrientes de que necessita. Quando suas flores se abrem, exalam um forte odor de carne em decomposição, que atrai muitas moscas em busca de alimento. As moscas, ao detectarem o engano, saem da flor, mas logo pousam em outra, transportando e depositando no estigma desta os grãos de pólen trazidos da primeira flor. O texto descreve duas interações biológicas e um processo, que podem ser identificados, respectivamente, como 2. e

a) inquilinismo, mutualismo e polinização.
b) inquilinismo, comensalismo e fecundação.
c) parasitismo, mutualismo e polinização.
d) parasitismo, comensalismo e fecundação.
e) parasitismo, comensalismo e polinização.

Questões discursivas

3. (Fuvest-SP)

a) Apesar de o predatismo ser descrito como uma interação positiva para o predador e negativa para a presa, pode-se afirmar que os predadores têm um efeito positivo sobre a população de presas. Explique como uma população de presas pode ser beneficiada por seus predadores.

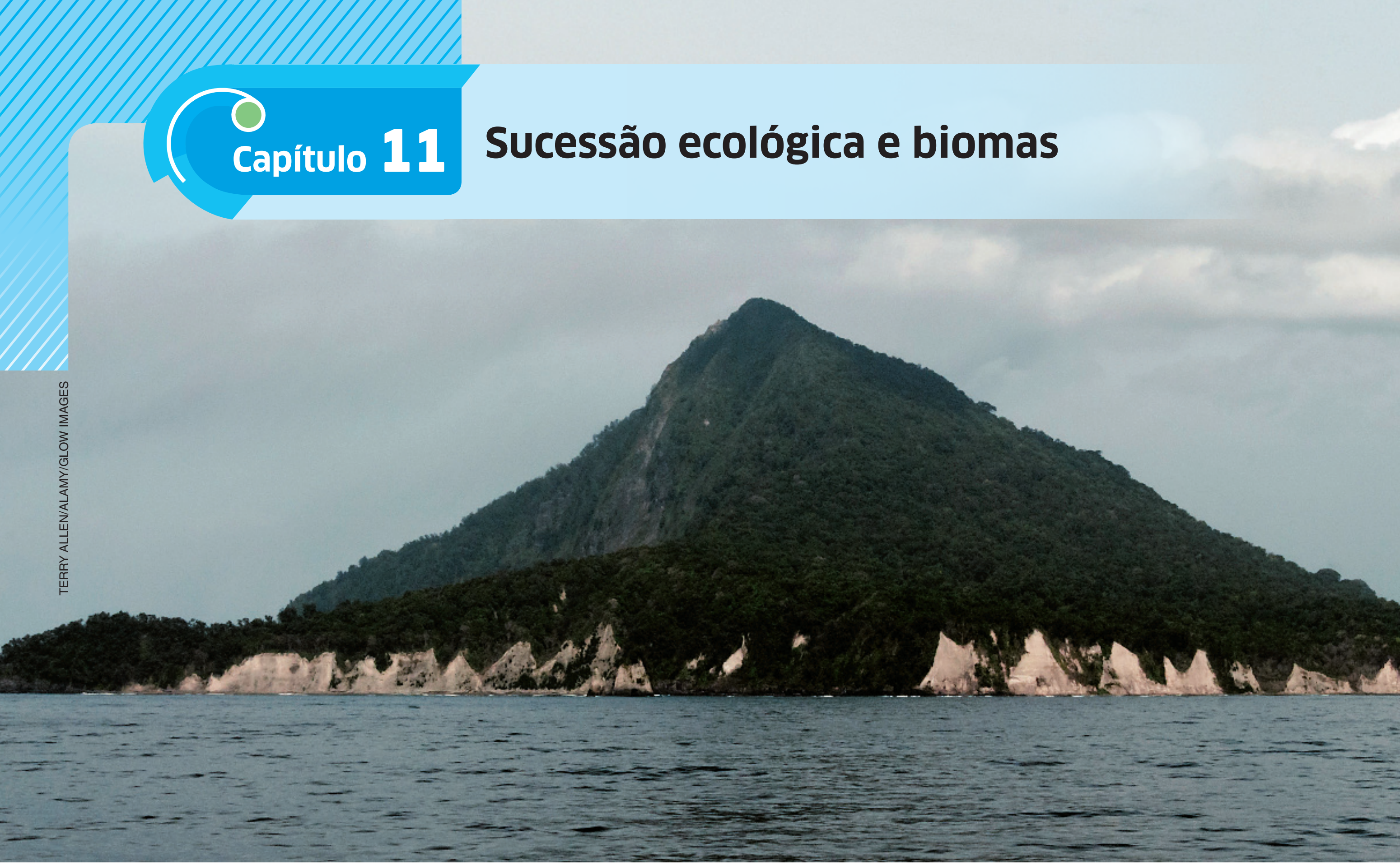
b) Alguns ecologistas consideram os herbívoros comedores de sementes como predadores das populações de plantas que lhes fornecem alimento. Já os herbívoros que se alimentam apenas de folhas são considerados parasitas das plantas que comem. Justifique essas classificações.

4. (UFRRJ) Muitas leguminosas apresentam, em suas raízes, nódulos causados por bactérias fixadoras de nitrogênio em células vegetais.

a) Como denominamos essa relação ecológica?

b) Descreva o que ocorre nessa relação ecológica, destacando as vantagens para os organismos envolvidos.

Capítulo 11 Sucessão ecológica e biomas


TERRY ALLEN/ALAMY/GLOW IMAGES

Ilha de Rakata (Indonésia, 2011), que foi totalmente devastada por uma erupção vulcânica em 1883 e hoje está novamente coberta de vegetação.

Catástrofe e renascimento em Krakatoa

Quem navega hoje pelo arquipélago localizado entre as ilhas de Sumatra e Java pode ver Rakata, uma ilha coberta por densas florestas verdes. É difícil imaginar que em 1883 ocorreu ali um dos mais violentos eventos vulcânicos de que se tem notícia. Da ilha vulcânica Krakatau (ou Krakatoa, como é mais conhecida), restou apenas a extremidade sul – Rakata –, coberta por uma camada de cinza vulcânica incandescente, com temperaturas entre 300 °C e 850 °C e mais de 40 metros de espessura. Depois de esfriar, a cinza transformou-se em rocha vulcânica porosa de baixa densidade, a pedra-pome. Esse evento catastrófico extinguiu todas as formas de vida em terra firme daquela ilha.

Uma expedição biológica realizada em maio de 1884 encontrou no local apenas uma pequena aranha, provavelmente trazida pelo vento de alguma ilha situada a pelo menos 44 quilômetros de distância. Em outubro do mesmo ano, foram encontradas duas espécies de gramínea crescendo sobre as rochas vulcânicas. Em 1886, entre gramíneas e arbustos, havia 15 espécies estabelecidas na ilha. Onze anos depois, em 1897, já eram 49 espécies.

Em 1919, 36 anos após a catástrofe, Rakata estava coberta por pradarias e alguns pequenos trechos de floresta. Na década de 1930, apresentava amplas áreas de floresta em substituição às pradarias. Hoje, a ilha está coberta por uma floresta tropical, típica da região.

Em 1997, o professor Ian Thornton, da Universidade Latrobe, na Austrália, fez o seguinte comentário a respeito da recolonização de Rakata: “Uma lição otimista: o ecossistema de floresta tropical é capaz de se recuperar de danos traumáticos extremos, se deixado sem interferência por tempo suficiente. Em um século, o que restou de Krakatau [...] está agora coberto por uma floresta tropical, desde a praia até seu pico de 800 metros de altura. [...] existem agora mais de 400 espécies de plantas vasculares, milhares de espécies de artrópodes, inclusive 54 espécies de borboletas, mais de 30 espécies de aves, 18 espécies de moluscos terrestres, 17 espécies de morcegos e 9 de répteis. E esses componentes do sistema tiveram de atravessar 44 quilômetros de oceano para atingir as ilhas!”[1]

---

[1] O comentário do prof. Ian Thornton foi obtido de: <http://whyfiles.org/031volcano/6.html>. Acesso em: jan. 2016. (Tradução dos autores.)

A importância do assunto

A natureza viva não é imune à destruição, mas é capaz de superar desastres. Esse é o ponto central do texto de abertura, sobre a recuperação do ecossistema em Rakata, porção remanescente da ilha Krakatau (Indonésia), após a violenta erupção vulcânica de 1883.

A recolonização de Rakata é um exemplo do que os biólogos denominam sucessão ecológica, assunto tratado no primeiro item deste capítulo. Ao estudar esse tema, você poderá constatar quanto os seres vivos dependem uns dos outros. A vida em nosso planeta é um empreendimento coletivo, em que diferentes espécies contribuem para a construção de ecossistemas complexos. Quanto maior for a nossa compreensão da trama da vida na natureza, maiores serão as nossas chances de conviver harmoniosamente com ela.

O estudo da sucessão ecológica abre caminho para conhecer os diferentes tipos de comunidades que atingem seu clímax em cada local do planeta: cerrados, savanas, florestas, desertos etc. A valorização e a preservação desses ambientes naturais são desafios para a humanidade. Reconhecer as feições características de cada ambiente é mais que cultura: é um exercício de cidadania.

11.1 Sucessão ecológica

A colonização de um ambiente por novas comunidades biológicas denomina-se **sucessão ecológica**; no início, o ambiente em processo de colonização pode ser totalmente desprovido de vida ou ter sido parcialmente destruído por catástrofes naturais ou antrópicas (do grego *antropos*, ser humano). No decorrer do processo de sucessão, as espécies que compõem a comunidade biológica se alteram gradualmente, de forma ordenada e progressiva.

Ao abordar com os alunos o tema da sucessão ecológica, é importante destacar a contribuição das teias de relações na estabilidade do sistema ecológico e no aparecimento de novos organismos, vinculando os assuntos tratados nos diferentes capítulos e promovendo uma visão integrada do ecossistema.

Quando a sucessão se passa em ambientes inicialmente desprovidos de vida, onde as condições de clima e de solo são pouco favoráveis ao estabelecimento de seres vivos, como superfícies de lavas vulcânicas recém-solidificadas, de rochas, dunas etc., fala-se em **sucessão primária**. É o caso da recolonização da ilha de Rakata, na Indonésia, comentado na abertura deste capítulo.

Apesar das condições iniciais altamente desfavoráveis, certas espécies de organismos – as **espécies pioneiras** – conseguem se instalar nesses lugares inóspitos e abrir caminho para a chegada de outras espécies.

Dunas, por exemplo, são geralmente colonizadas por certas espécies de gramínea, cujas sementes são trazidas pelo vento. Essas plantas conseguem suportar o calor, a escassez de água e o solo pouco estável e dão início à colonização. Os liquens também são importantes na colonização de locais inicialmente desfavoráveis à existência de seres vivos, como a superfície de rochas. Os biólogos utilizam o termo **ecese** para designar a comunidade inicial de uma sucessão ecológica. (Fig. 11.1)

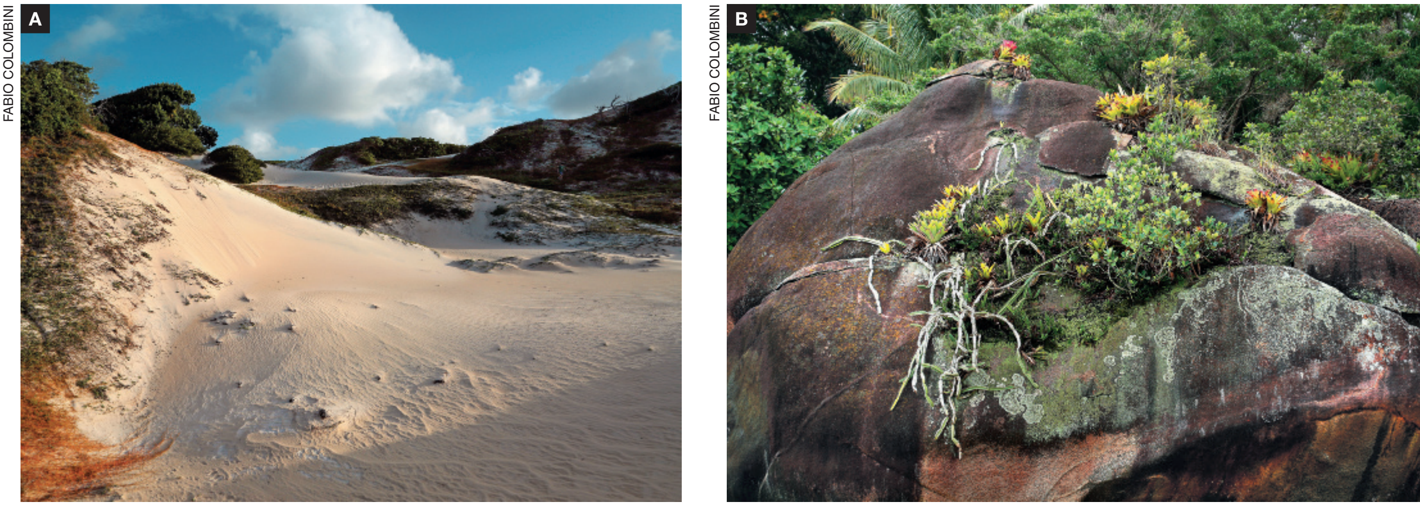


Figura 11.1 A. Parque das Dunas (Natal, RN, 2014). **B.** Liquens, musgos, bromélias e cactáceas sobre rochas (Ubatuba, SP, 2007).

Quando a sucessão ocorre em locais parcialmente destruídos, mas anteriormente ocupados por comunidades biológicas, fala-se em **sucessão secundária**. Nesse caso, as mudanças geralmente são mais rápidas, pois as condições iniciais costumam ser mais favoráveis ao estabelecimento de seres vivos do que na sucessão primária. Exemplos de sucessão secundária são a recolonização de campos de cultivo abandonados, de regiões desflorestadas, de áreas destruídas por queimadas ou de lagos recém-formados.

À medida que é colonizado pelas espécies pioneiras, o ambiente gradualmente se modifica. As variações na temperatura do solo tornam-se menos bruscas e o grau de umidade aumenta. Material orgânico resultante da decomposição dos cadáveres das espécies pioneiras acumula-se no solo, disponibilizando nutrientes e aumentando a capacidade de reter água. No caso das dunas, por exemplo, as raízes das plantas pioneiras ajudam a estabilizar o solo, evitando que as partículas arenosas sejam facilmente carregadas pelo vento. Com as novas condições criadas pelas espécies pioneiras, outras plantas e animais podem se estabelecer no local. As espécies recém-chegadas competem com as pioneiras e, pouco a pouco, tomam o lugar delas.

As sucessivas gerações de plantas e animais que nascem, crescem, morrem e se decompõem tornam o solo cada vez mais rico em matéria orgânica e umidade. Um local antes desabitado passa a abrigar uma comunidade biológica. A complexidade da comunidade depende de alguns fatores, como o tempo que se passou desde o início da colonização, as condições climáticas locais e as espécies colonizadoras. (Fig. 11.2)

Ao trabalhar a sucessão primária e, principalmente, a sucessão secundária, explore com os alunos a capacidade de recuperação dos ecossistemas naturais. Uma sugestão é propor a eles que observem a região onde moram em busca de ambientes em que a sucessão ecológica secundária esteja ocorrendo, como em um terreno baldio, ou, ainda, que pesquisem exemplos de sucessão ecológica como o apresentado no início deste capítulo.

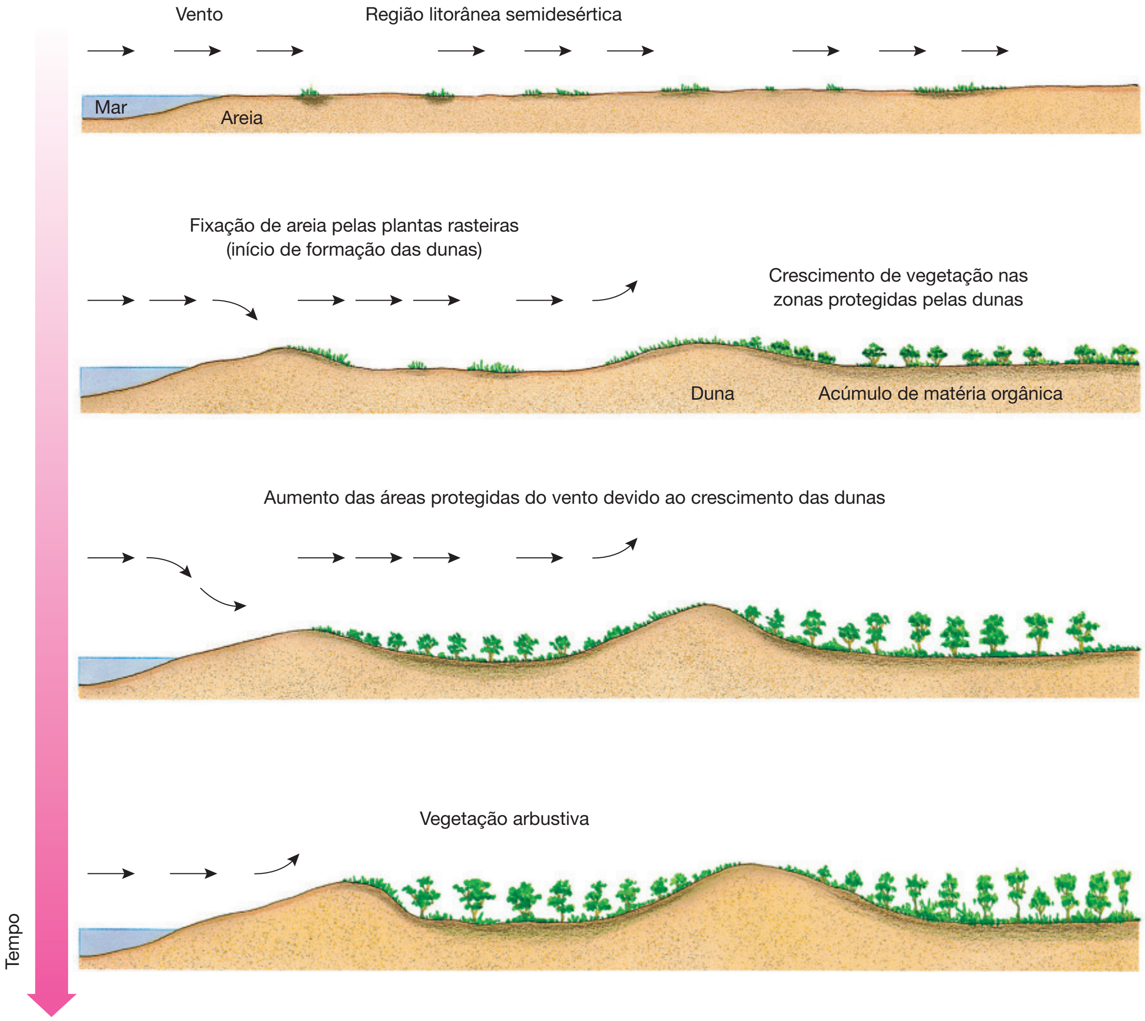

Vento
Região litorânea semidesértica
Mar
Areia
Fixação de areia pelas plantas rasteiras
(início de formação das dunas)
Crescimento de vegetação nas
zonas protegidas pelas dunas
Duna
Acúmulo de matéria orgânica
Aumento das áreas protegidas do vento devido ao crescimento das dunas
Vegetação arbustiva
Tempo

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 11.2 Representação esquemática de sucessão ecológica em dunas. Nesse caso, a vegetação pioneira contribui para a fixação das dunas, o que modifica a ação dos ventos e provoca alterações climáticas. O clima local torna-se cada vez mais propício ao estabelecimento de seres vivos. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

A cada estágio do processo de sucessão, a comunidade altera a estrutura do ambiente e as condições climáticas locais, determinando um **microclima**, com novas possibilidades de colonização por outras espécies. Com isso, as espécies mais antigas são gradualmente substituídas pelas que chegam. Nas comunidades que se sucedem, a **biodiversidade** torna-se cada vez maior. A biomassa e a estabilidade da comunidade também aumentam durante a sucessão.

O processo de sucessão leva ao estabelecimento de uma comunidade biológica relativamente estável e bem adaptada às condições locais. A estabilidade é garantida pela ampla rede de interações construídas durante a sucessão de comunidades. A comunidade do estágio final de sucessão, em que a biodiversidade, a biomassa e as condições microclimáticas tendem a se estabilizar ao longo do tempo, é denominada **comunidade clímax**. A comunidade intermediária em um processo de sucessão ecológica é chamada **sere** ou estágio seral da sucessão.

11.2 Grandes biomas do mundo

O conceito de bioma

Pode-se definir **bioma** (do grego *bio*, vida, e *oma*, grupo ou massa) como uma área geográfica onde se desenvolve um ecossistema relativamente uniforme, caracterizado pelo clima, pelo solo e pela fisionomia de sua vegetação.

Regiões da Terra com latitudes coincidentes, em que prevalecem condições climáticas parecidas, geralmente têm formações vegetais com aparência semelhante, apresentando o mesmo tipo de bioma. Por exemplo, o bioma denominado floresta tropical predomina na faixa equatorial do planeta, tanto na América do Sul quanto na África, no sudeste da Ásia e na Oceania, embora em cada um desses locais haja espécies vegetais (e animais) distintas. Outro exemplo, o cerrado brasileiro, é um tipo de savana, bioma presente em latitudes coincidentes da América do Sul, da África e da Austrália. O gráfico a seguir, denominado climográfico, mostra a relação entre os principais biomas da América do Norte quanto a dois fatores climáticos: a temperatura e a pluviosidade (índice de chuvas). (Fig. 11.3)

Climográfico dos biomas da América do Norte

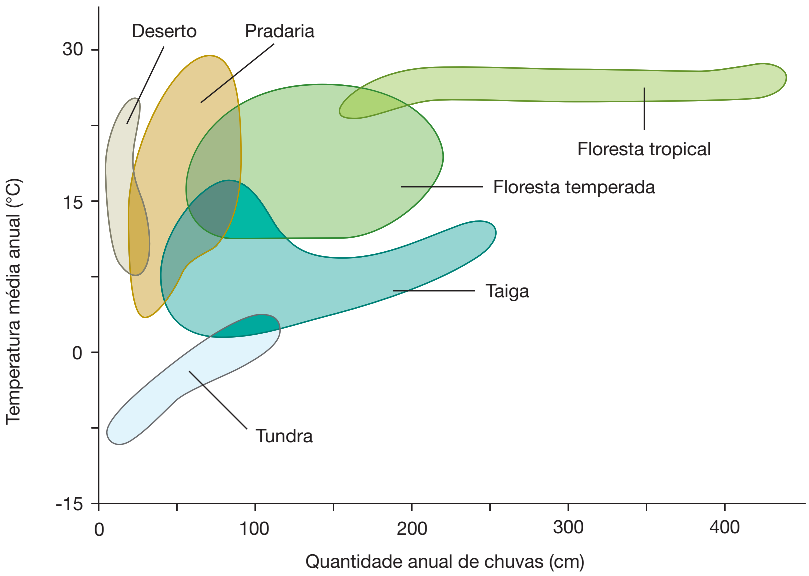


ILUSTRAÇÃO: ADILSON SECCO

Figura 11.3 Climográfico dos principais biomas da América do Norte. As áreas coloridas do gráfico mostram as condições de temperatura média e pluviosidade de determinado bioma. Por exemplo, as florestas tropicais ocorrem em áreas com temperatura média anual superior a 24 °C e pluviosidade entre 150 e 450 cm anuais. (Elaborado com base em Campbell, N. A. e cols., 1999.)

Os grandes biomas do mundo

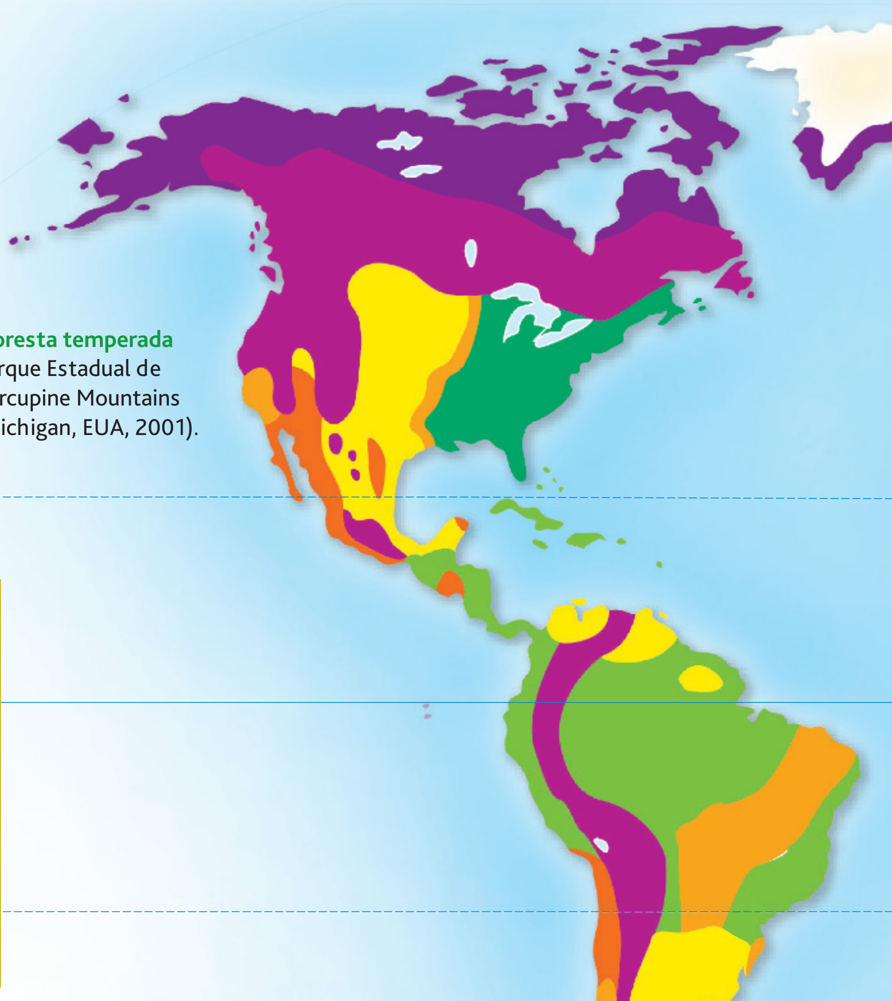
Neste capítulo, estudaremos os grandes biomas mais representativos em nosso planeta: tundras, taigas (florestas de coníferas), florestas temperadas, savanas, pradarias, florestas tropicais e desertos. (Fig. 11.4)

DAVID SCHULTZ/MINT IMAGES/GLOW IMAGES

Tundra
Parque Nacional Abisko (Kiruna, Suécia, 2006).

JOSEPH SOHM/VISIONS OF AMERICA/CORBIS/LATINSTOCK

Floresta temperada
Parque Estadual de Porcupine Mountains (Michigan, EUA, 2001).

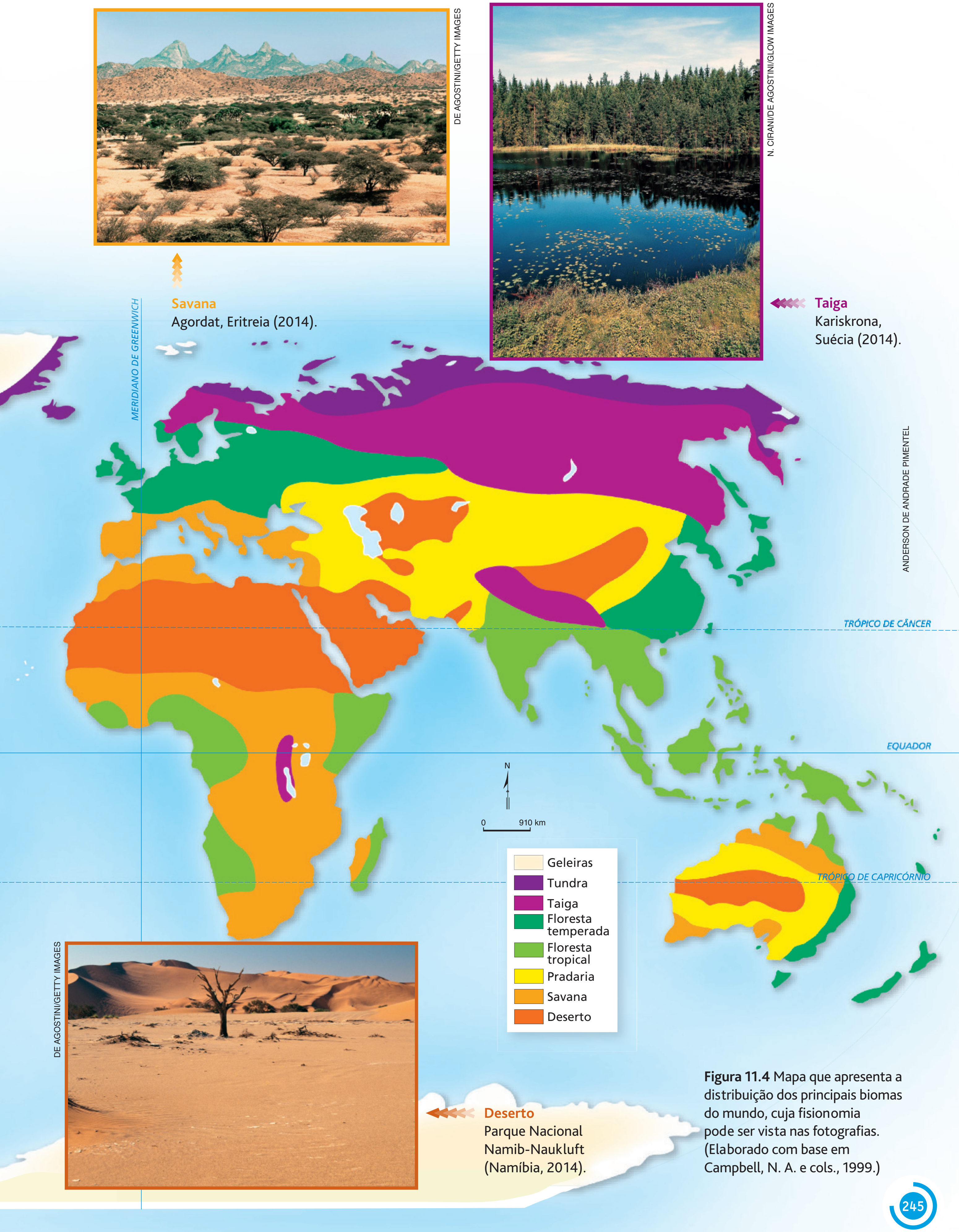


SUPERSTOCK/GLOW IMAGES

Pradaria
Flint Hills (Kansas, EUA, 2013).

ZIG KOCH/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

Floresta tropical
Floresta pluvial costeira em Campina Grande do Sul, no Paraná (2010).


MERIDIANO DE GREENWICH
TRÓPICO DE CÂNCER
EQUADOR
TRÓPICO DE CAPRICÓRNIO
N
0
910 km
Geleiras
Tundra
Taiga
Floresta temperada
Floresta tropical
Pradaria
Savana
Deserto

Savana
Agordat, Eritreia (2014).

DE AGOSTINI/GETTY IMAGES

Taiga
Kariskrona,
Suécia (2014).

N. CIRANI/DE AGOSTINI/GLOW IMAGES

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

Deserto
Parque Nacional
Namib-Naukluft
(Namíbia, 2014).

DE AGOSTINI/GETTY IMAGES

Figura 11.4 Mapa que apresenta a distribuição dos principais biomas do mundo, cuja fisionomia pode ser vista nas fotografias. (Elaborado com base em Campbell, N. A. e cols., 1999.)

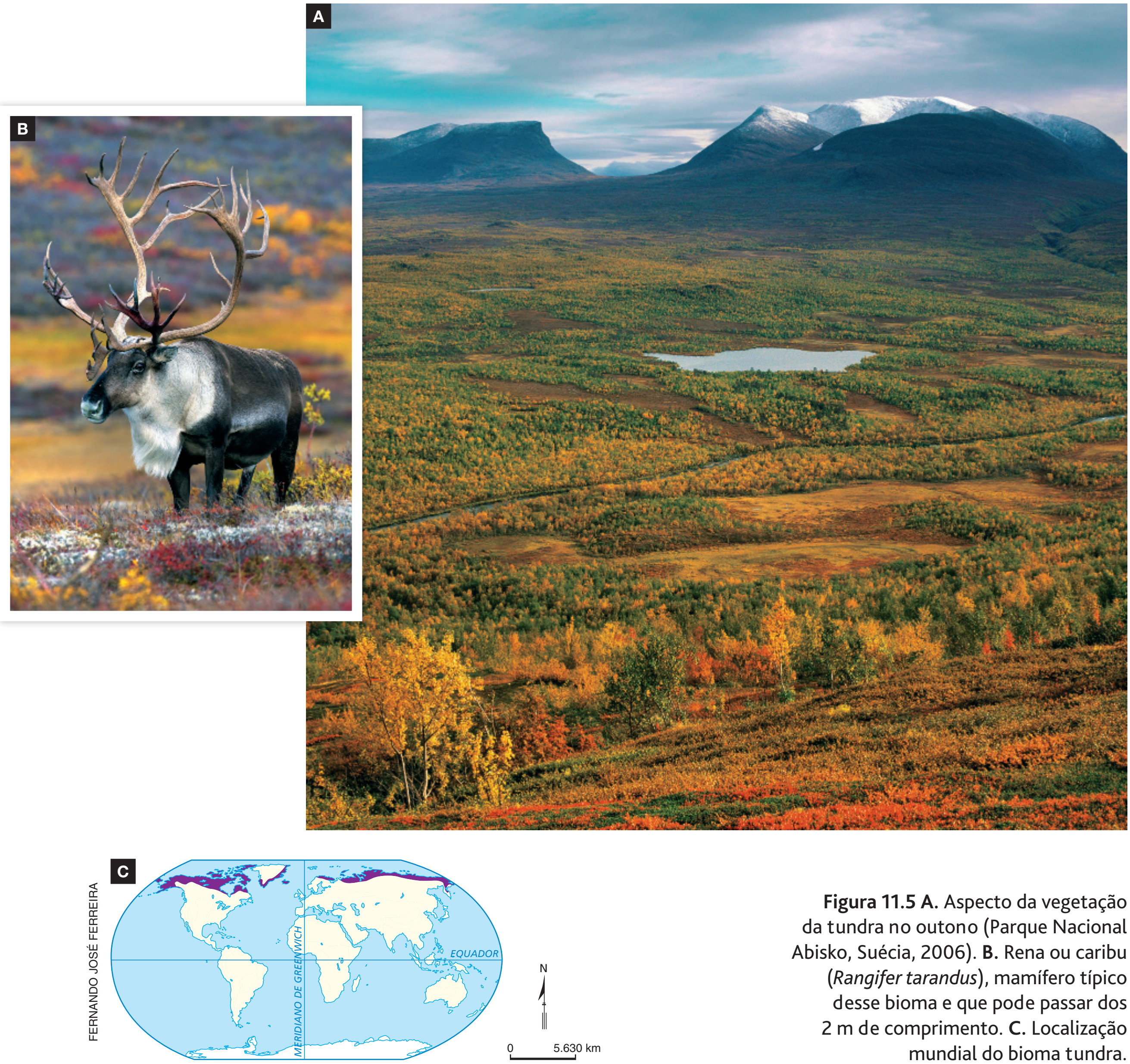
Tundra

As **tundras** situam-se nas regiões próximas ao Polo Ártico, no norte do Canadá, da Europa e da Ásia. Nesses locais, a neve cobre o solo durante quase todo o ano, exceto nos três meses de verão, quando a temperatura chega, no máximo, a 10 °C. Nessa estação, uma fina camada superficial do solo se descongela; poucos centímetros abaixo da superfície, porém, o solo permanece congelado, o que impede a drenagem da água do degelo e leva à formação de áreas pantanosas.

Embora não falte água no solo da tundra, as plantas não conseguem absorvê-la eficientemente devido à baixa temperatura. Desse modo, apesar de se encontrarem em solo encharcado, os vegetais sofrem falta de água, fenômeno que os biólogos denominam “seca fisiológica”.

Na tundra situada mais ao norte, a flora é constituída basicamente por musgos e liquens; mais ao sul, onde a temperatura média é mais elevada, há também gramíneas e pequenos arbustos.

Com relação à fauna de mamíferos, na tundra vivem a rena e o boi-almiscarado, entre outros. A pelagem densa desses animais os protege do frio, e eles conseguem sobreviver comendo apenas liquens, que procuram revolvendo a neve com os cascos. As aves da tundra, em sua maioria aves aquáticas pernaltas, migram para regiões mais quentes durante os meses de inverno. Há ainda algumas espécies de inseto, que hibernam durante o inverno e entram em atividade logo que o degelo se inicia. (Fig. 11.5)



CHAD EHLERS/STOCK CONNECTION/GLOW IMAGES

MARK RAYCROFT/MINDEN PICTURES/FOTOARENA

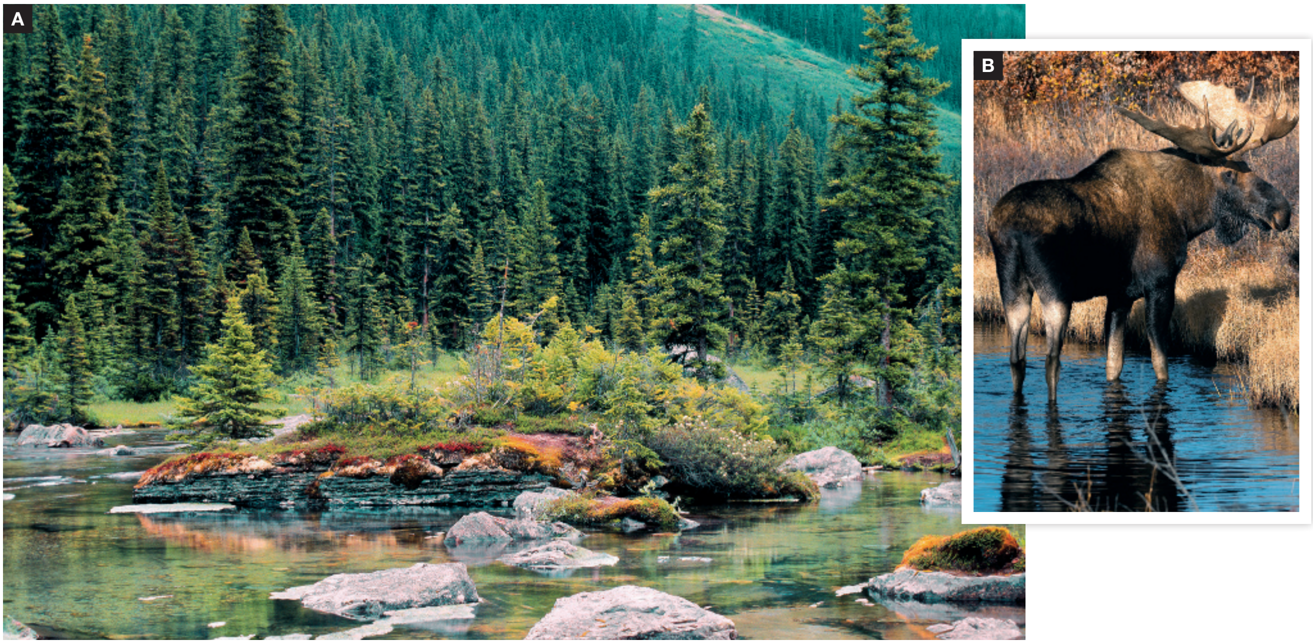
FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Figura 11.5 A. Aspecto da vegetação da tundra no outono (Parque Nacional Abisko, Suécia, 2006). **B.** Rena ou caribu (*Rangifer tarandus*), mamífero típico desse bioma e que pode passar dos 2 m de comprimento. **C.** Localização mundial do bioma tundra.

Taiga

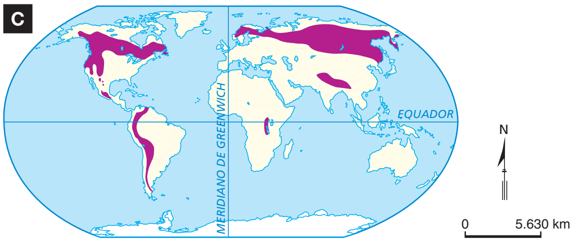
As **taigas** situam-se principalmente no Hemisfério Norte, ao sul das tundras. O clima é frio, com invernos quase tão rigorosos quanto os da tundra, embora o período quente seja um pouco mais longo e ameno. A taiga é também chamada **floresta de coníferas**, por ser constituída basicamente por árvores desse grupo de gimnospermas, como pinheiros e abetos. As coníferas têm folhas estreitas e afiladas (folhas aciculadas), adaptadas para resistir às baixas temperaturas. Na taiga também estão presentes musgos e liquens.

A fauna de mamíferos da taiga é composta de alces, ursos, lobos, raposas, *visons*, martas e esquilos, entre outros. A maioria das aves da taiga migra para o sul no inverno. (Fig. 11.6)



TT/GETTY IMAGES

MARK RAYCROFT/MINDEN PICTURES/FOTOARENA



FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Figura 11.6 A. Aspecto geral da vegetação da taiga (Alpine Lakes Wilderness, EUA, 2007). **B.** Alce da espécie *Alces americanus*, mamífero que vive nas taigas do Hemisfério Norte e chega a 3,2 m de comprimento. **C.** Localização mundial do bioma taiga.

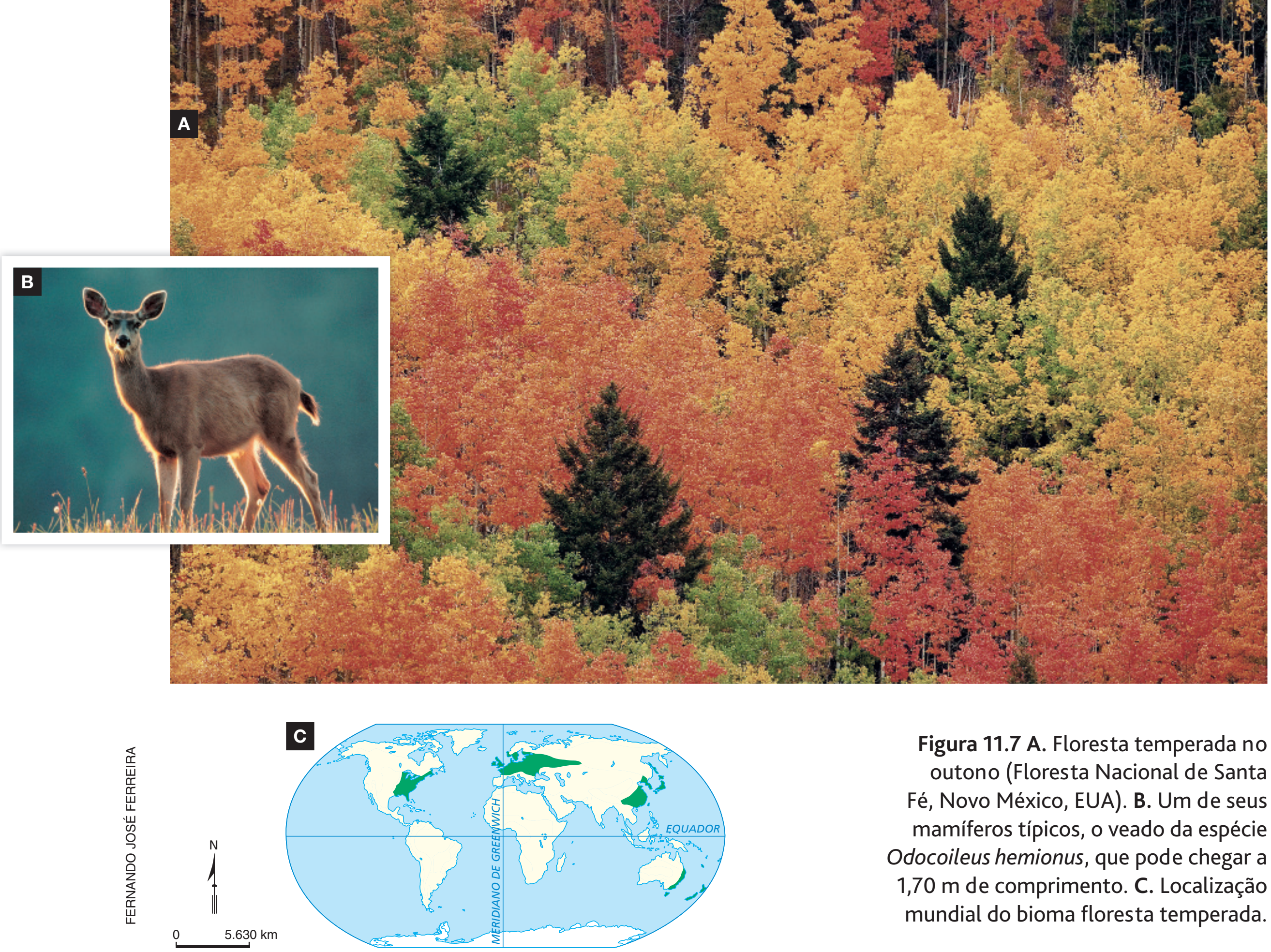
Floresta temperada

As **florestas temperadas** são bem desenvolvidas na América do Norte e na Europa, ocorrendo também na Rússia, na China, no Japão e na Austrália. Trata-se de um bioma típico de regiões de clima temperado, em que as quatro estações do ano são bem definidas.

Na floresta temperada predominam árvores que perdem as folhas no fim do outono e as readquirem na primavera, sendo por isso chamadas plantas decíduas (do latim *deciduus*, que cai) ou caducifólias (do latim *caducus*, que cai). A perda das folhas constitui uma adaptação ao inverno rigoroso, pois possibilita que a planta reduza sua atividade metabólica e suporte as baixas temperaturas.

Na Europa, as árvores mais típicas da floresta temperada são os carvalhos e as faias. Na América do Norte, predominam os bordos e algumas espécies de carvalhos e faias. Além dessas árvores, tanto na Europa quanto na América do Norte, há arbustos, plantas herbáceas e musgos.

Com relação à fauna de mamíferos, a floresta temperada é o hábitat de muitas espécies: javali, veado, raposa e doninha, além de espécies arborícolas de esquilo e arganaz (pequenos roedores que lembram esquilos). Há também vários tipos de pássaros e corujas e dezenas de espécies de inseto. (Fig. 11.7)



TIM FITZHARRIS/MINDEN PICTURES/FOTOARENA

RALPH LEE HOPKINS/GETTY IMAGES

FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Figura 11.7 A. Floresta temperada no outono (Floresta Nacional de Santa Fé, Novo México, EUA). **B.** Um de seus mamíferos típicos, o veado da espécie *Odocoileus hemionus*, que pode chegar a 1,70 m de comprimento. **C.** Localização mundial do bioma floresta temperada.

Floresta tropical

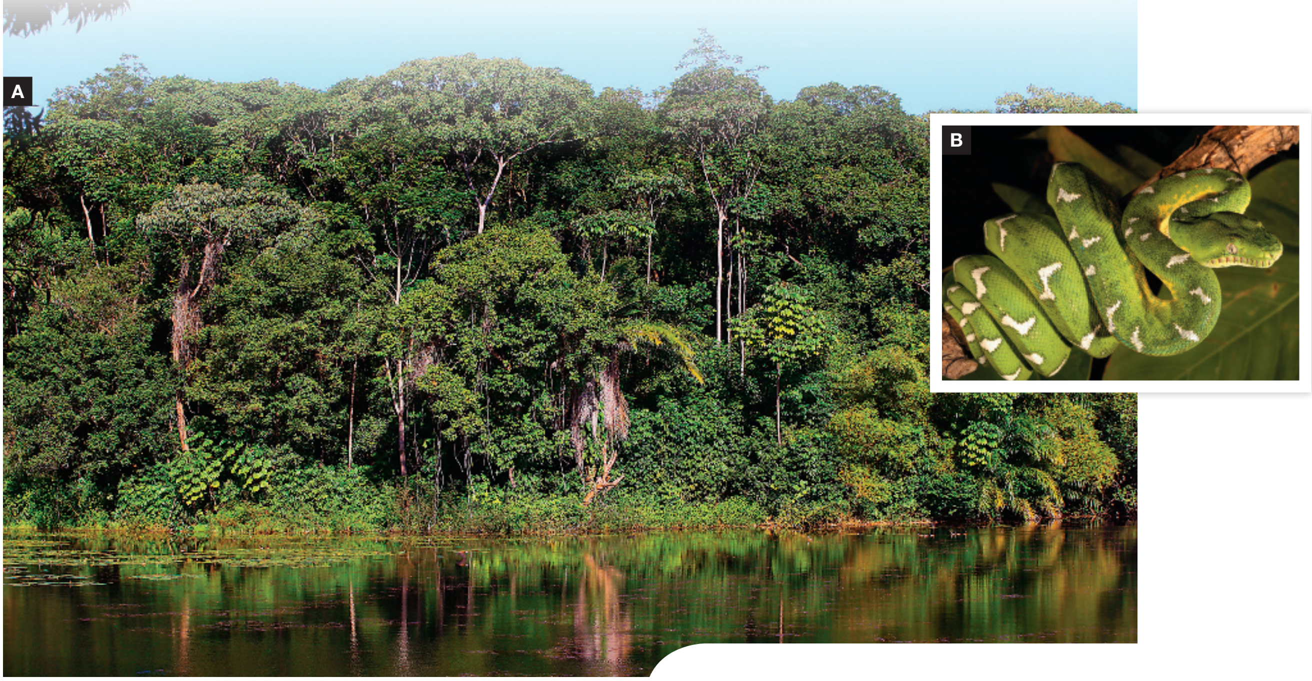
As **florestas tropicais**, também chamadas **florestas pluviais tropicais**, ocorrem na faixa equatorial da Terra, em regiões de clima quente, com alto índice de chuvas e com estações do ano menos definidas que as das regiões temperadas. Há florestas pluviais tropicais no norte da América do Sul (Bacia Amazônica), na América Central, na África, na Oceania e na Ásia.

A vegetação da floresta tropical é exuberante, com árvores de grande porte e folhas perenifólias (do latim *perennis*, perpétuo, duradouro), que perduram ao longo das estações do ano. As folhas de muitas espécies são largas e delicadas, sendo por isso denominadas latifoliadas (do latim *latus*, largo, amplo, e *folia*, folha).

As copas das árvores mais altas formam um "teto" ou "dossel" de vegetação, sob o qual existe um "andar" inferior, constituído pelas copas de árvores mais baixas. Em áreas da floresta pode haver andares gradativamente inferiores, até chegar ao nível dos arbustos e das plantas rasteiras. Essa estrutura em camadas, ou estratificação (do latim *stratum*, camada), origina diversos microclimas em cada nível, com diferentes graus de luminosidade e umidade. Os troncos das árvores são ocupados por muitas plantas epífitas, como bromélias e samambaias, que disputam por melhores condições de luminosidade.

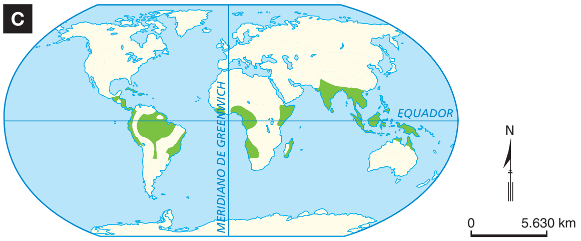
Nas florestas tropicais, a reciclagem da matéria orgânica é rápida: cadáveres de plantas e de animais, fezes e folhas que caem são rapidamente decompostos e seus elementos químicos são reciclados. Forma-se, no solo, uma camada fértil de cor escura – o **húmus** –, resultante da decomposição da matéria orgânica. A derrubada de uma floresta leva ao rápido empobrecimento do solo em nutrientes; isso ocorre porque, sem a cobertura vegetal e a constante reciclagem de elementos químicos, os nutrientes minerais do solo são carregados pelas chuvas, processo denominado **lixiviação**.

A grande quantidade de ambientes internos nas florestas tropicais possibilita a existência de fauna rica e variada. As árvores são habitadas por muitos animais vertebrados, como mamíferos (macacos e esquilos), répteis (serpentes e lagartos) e anfíbios (sapos e pererecas). No solo também há anfíbios, répteis, mamíferos herbívoros (veados, antas etc.) e mamíferos carnívoros (onças, gatos-do-mato etc.), além de inúmeros invertebrados, principalmente insetos (mosquitos, besouros, formigas etc.). (Fig. 11.8)



RUBENS CHAVES/PULSAR IMAGENS

PETE OXFORD/MINDEN PICTURES/FOTOARENA

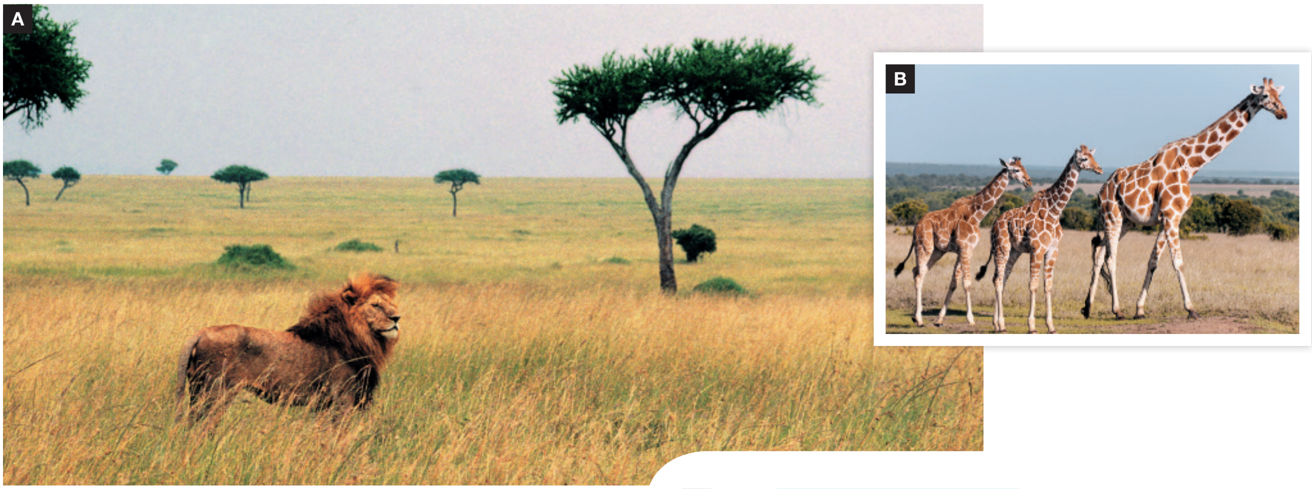


FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Figura 11.8 A. Floresta tropical na zona da mata pernambucana (Igarassu, PE, 2007). **B.** Jiboia da espécie *Corallus caninus*, que pode chegar a 2,2 m de comprimento. **C.** Localização mundial do bioma floresta tropical.

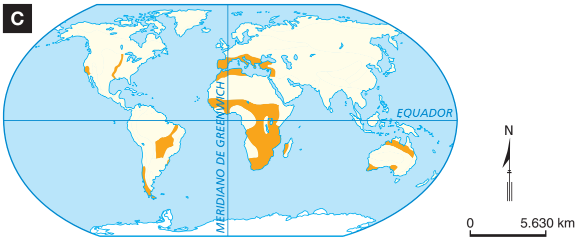
Savana

As **savanas** caracterizam-se pela presença de arbustos e árvores de pequeno porte, além de gramíneas. São encontradas na África, na Ásia, na Europa, na Austrália e nas Américas. Na savana africana, por exemplo, a fauna compõe-se de herbívoros de grande porte (antílopes, zebras, girafas, elefantes e rinocerontes) e de grandes carnívoros (leões, leopardos, guepardos, hienas etc.). Há diversas espécies de pássaros, gaviões e aves corredoras, entre elas o avestruz. No Brasil, um tipo de savana é o cerrado, que será estudado mais adiante. (Fig. 11.9)



IMAGES OF AFRICA PHOTOBANK/ALAMY/GLOW IMAGES

TUI DE ROY/MINDEN PICTURES/FOTOARENA



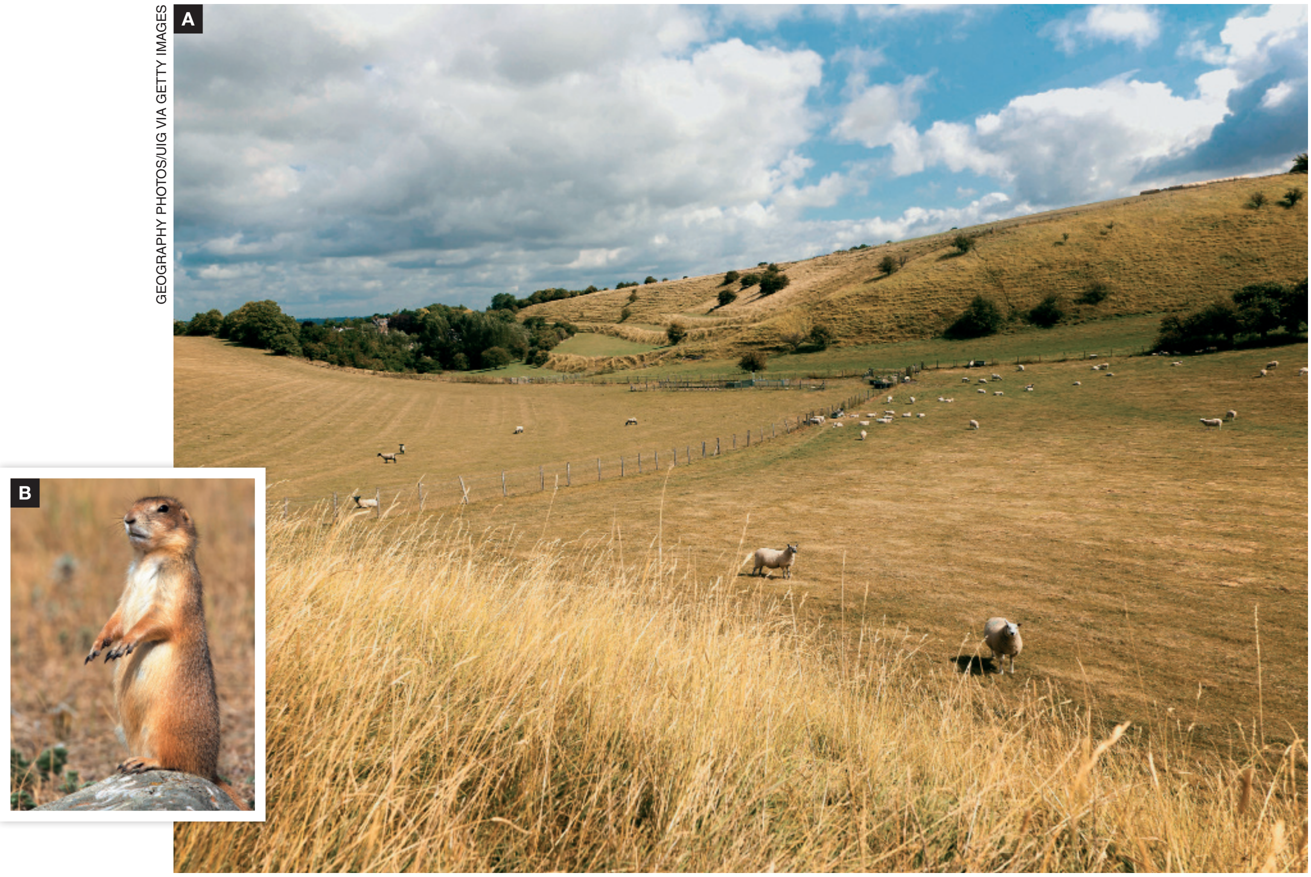
FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Figura 11.9 A. Vegetação da savana na Reserva Nacional Masai Mara (Quênia, 2008). **B.** Girafa fêmea acompanhada de dois filhotes (*Giraffa camelopardalis*), herbívoro típico desse bioma, que pode atingir 6 m de altura. **C.** Localização mundial do bioma savana.

Pradaria

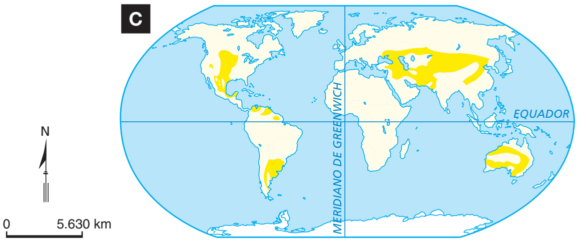
As **pradarias**, ou **campos**, apresentam vegetação constituída predominantemente por gramíneas. Esse bioma é encontrado em regiões marcadas por períodos de seca, como certas áreas da América do Norte e da América do Sul. Os pampas, que ocorrem no sul do Brasil e que serão tratados adiante, são um tipo de pradaria.

A fauna da pradaria é constituída por roedores (pequenos mamíferos como *hamsters* e marmotas) e carnívoros (lobos, coiotes e raposas). Também são abundantes os insetos. (Fig. 11.10)



GEOGRAPHY PHOTOS/UIG VIA GETTY IMAGES

YVA MOMATIUK & JOHN EASTCOTT/
MINDEN PICURES/FOTOARENA



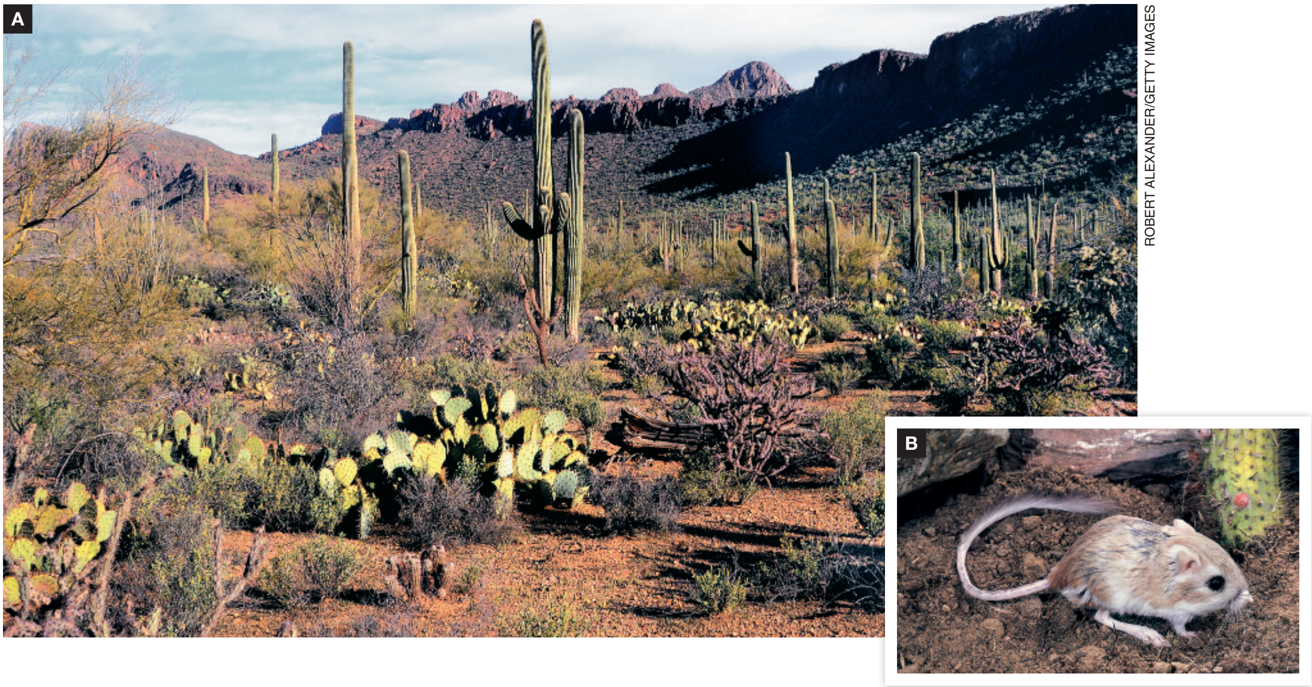
FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Figura 11.10 A. Vegetação típica da pradaria (Wiltshire, Inglaterra, 2014). **B.** Cão-da-pradaria (*Cynomys ludovicianus*), roedor típico desse bioma que mede cerca de 40 cm de comprimento. **C.** Localização mundial do bioma pradaria.

Deserto

Os **desertos** localizam-se em regiões de pouca umidade. A vegetação desse bioma, constituída por gramíneas e pequenos arbustos, é rala e espaçada, presente apenas em locais mais úmidos, como fendas no solo ou debaixo de rochas. As maiores regiões desérticas do globo situam-se na África (deserto do Saara) e na Ásia (deserto de Gobi).

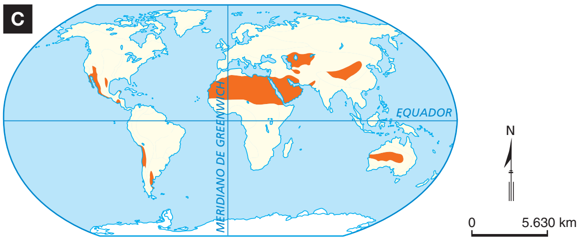
A fauna predominante no deserto é composta principalmente de animais roedores (ratos-cangurus e marmotas), répteis (serpentes e lagartos) e insetos. Animais e plantas do deserto apresentam adaptações marcantes à escassez de água. Nos cactos, por exemplo, as folhas são modificadas em espinhos, adaptação que reduz a área da planta que perde água por transpiração. Muitos animais do deserto também exibem adaptações marcantes, como o comportamento de sair das tocas somente à noite ou passar a vida inteira sem beber água, extraindo-a exclusivamente do alimento quase seco que ingerem. (Fig. 11.11)



ROBERT ALEXANDER/GETTY IMAGES

ANTHONY MERCIECA/SCIENCE SOURCE/FOTOARENA

Figura 11.11 A. Deserto do Parque Nacional Saguaro (Arizona, EUA, 2014). **B.** Rato-canguru da espécie *Dipodomys deserti*, roedor que mede aproximadamente 8 cm de comprimento (sem a cauda) e que pode passar a vida toda sem beber água. **C.** Localização mundial do bioma deserto.



FERNANDO JOSÉ FERREIRA

11.3 Domínios morfoclimáticos e biomas do Brasil

Domínios morfoclimáticos brasileiros

Considerando características climáticas, botânicas, hidrológicas, fitogeográficas e edáficas (relativas ao solo), o geógrafo brasileiro Aziz Ab'Sáber (1924-2012) considerou a existência de seis grandes **domínios morfoclimáticos** em nosso país. Cada um desses domínios é caracterizado por um bioma típico, podendo apresentar outros tipos de bioma em áreas específicas.

Os seis domínios morfoclimáticos propostos por Ab'Sáber são:

- **Domínio Amazônico**, no qual encontramos o bioma de floresta tropical de terra firme, um dos mais típicos, bem como os biomas de floresta de igapó inundável e das caatingas do Rio Negro, entre outros.
- **Domínio dos Mares de Morros** (ou Domínio Atlântico), cujo bioma mais típico é a floresta pluvial costeira; nesse domínio também estão incluídos os biomas de restinga e os manguezais;
- **Domínio dos Cerrados**, em que predomina uma vegetação típica conhecida como cerrado;
- **Domínio das Caatingas**, em que predomina um bioma de savana semiárido, incluindo também os carnaubais;
- **Domínio das Araucárias**, em que predominam as florestas de araucária;
- **Domínio das Pradarias**, em que predominam os campos sulinos.

Além desses seis domínios, há áreas de transição, que abrigam biomas com características intermediárias ou que não se enquadram em nenhum dos seis domínios. Esse é o caso do Pantanal Mato-Grossense, uma região de transição, constituída por um conjunto de diferentes biomas, entre os quais se destacam vastas planícies inundáveis. Outros exemplos de biomas localizados em áreas de transição são as matas de cocais e os manguezais.

Se houver tempo e interesse, busque os tipos de bioma mais próximos da escola e organize visitas guiadas com os alunos. Essa prática, além de possibilitar a valorização desses ambientes pelos estudantes, auxilia no reconhecimento das feições características dos biomas e, portanto, na compreensão dos alunos sobre o tema.

O território do Brasil, que se estende de pouco acima do Equador até abaixo do Trópico de Capricórnio, propicia a existência de diversos biomas, que estão distribuídos nos seus seis domínios morfoclimáticos e nas suas áreas de transição. Os biomas mais importantes, tanto pela área que ocupam quanto pela biodiversidade, são: floresta amazônica (hileia); floresta pluvial costeira (floresta atlântica); floresta de araucárias; cerrado; pampa; caatinga; floresta de cocais (babaçual); manguezal; e os que compõem o Pantanal Mato-Grossense. (Fig. 11.12)

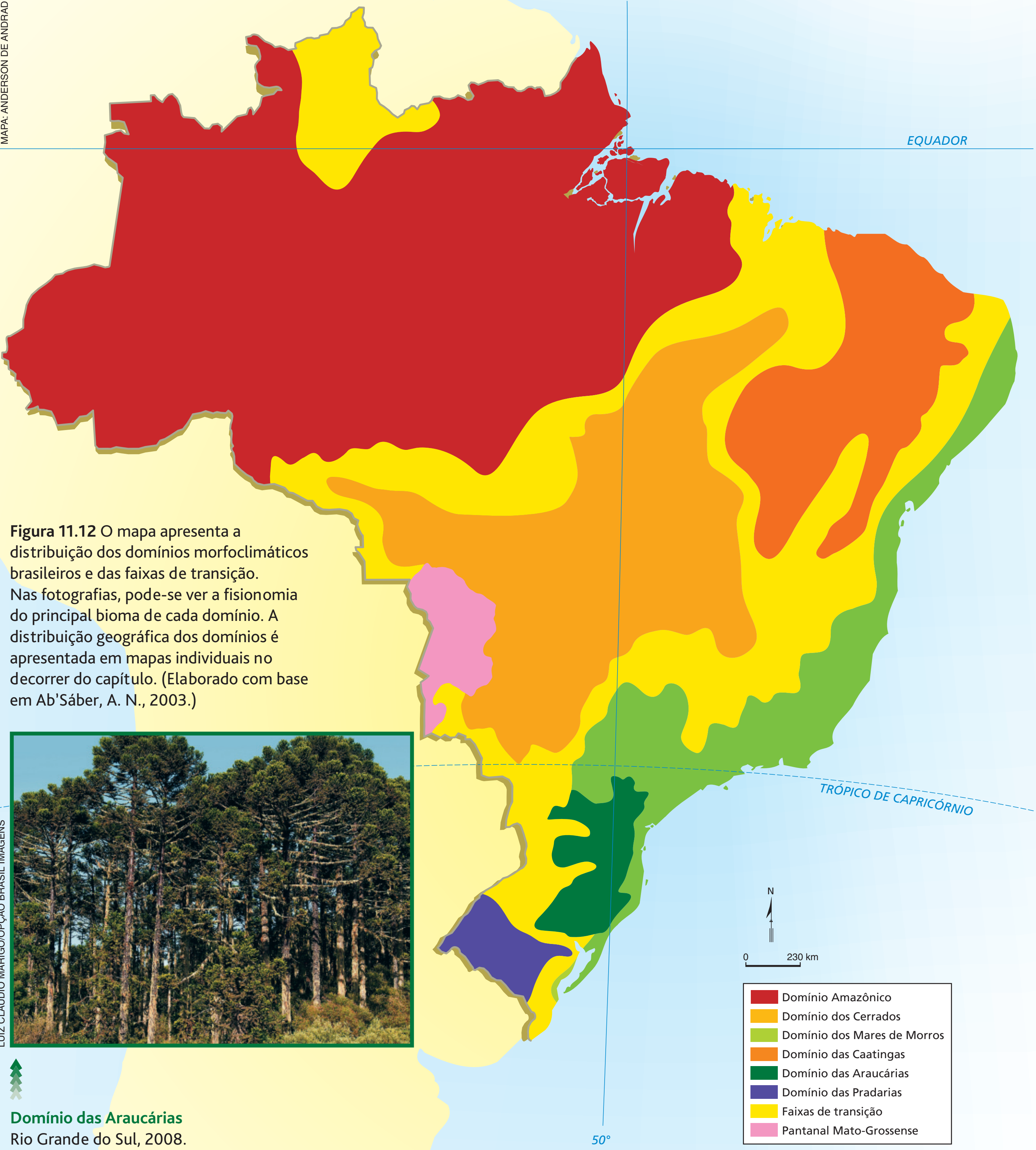
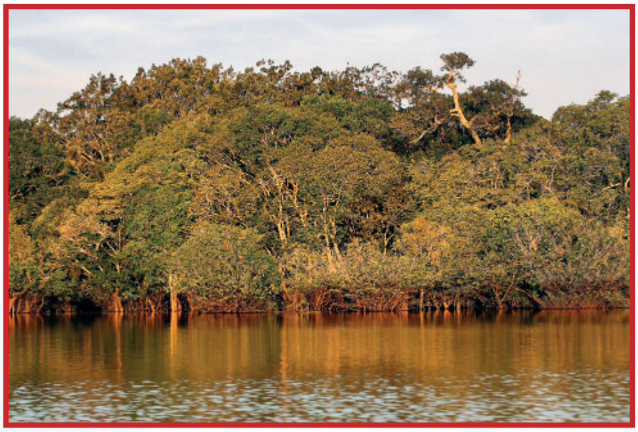

MAPA: ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL
EQUADOR
TRÓPICO DE CAPRICÓRNIO
N
0
230 km
50°
🟥 Domínio Amazônico
🟧 Domínio dos Cerrados
🟩 Domínio dos Mares de Morros
🟧 Domínio das Caatingas
🟩 Domínio das Araucárias
🟪 Domínio das Pradarias
🟨 Faixas de transição
🟪 Pantanal Mato-Grossense

Figura 11.12 O mapa apresenta a distribuição dos domínios morfoclimáticos brasileiros e das faixas de transição. Nas fotografias, pode-se ver a fisionomia do principal bioma de cada domínio. A distribuição geográfica dos domínios é apresentada em mapas individuais no decorrer do capítulo. (Elaborado com base em Ab'Sáber, A. N., 2003.)

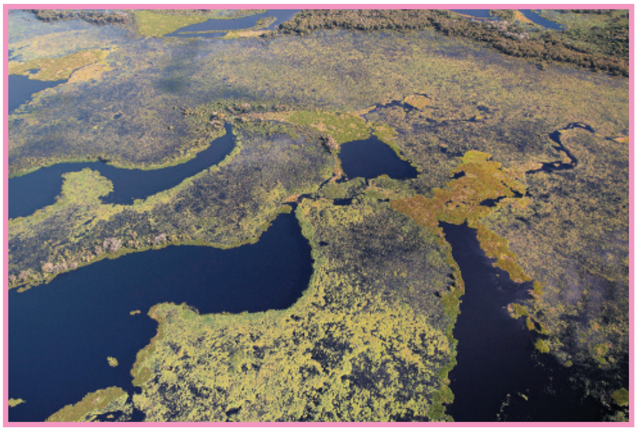
LUIZ CLÁUDIO MARIGO/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

Domínio das Araucárias
Rio Grande do Sul, 2008.



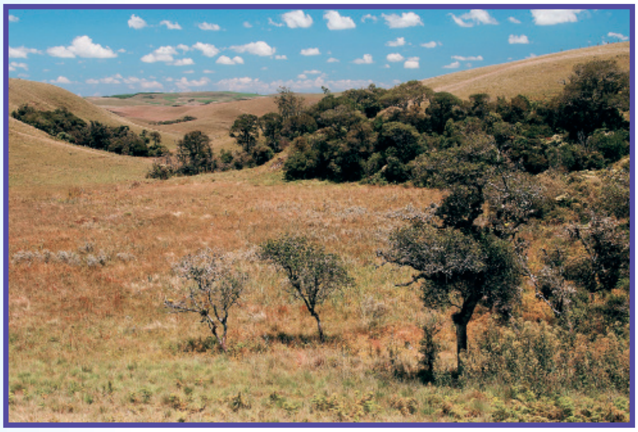
FABIO COLOMBINI

Domínio Amazônico
Igarapé Tarumã-Açu, Amazonas, 2014.



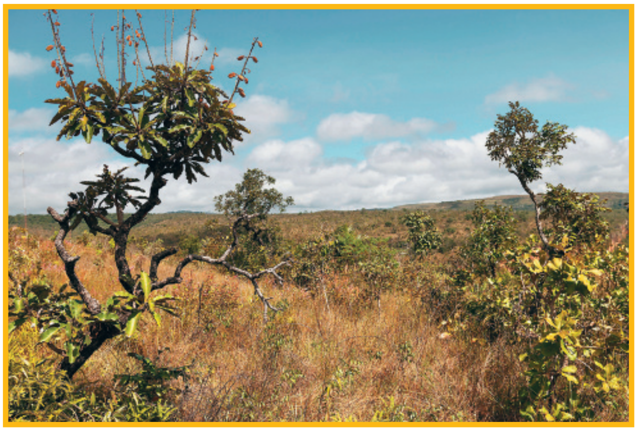
MARIO FRIEDLANDER/PULSAR IMAGENS

Pantanal Mato-Grossense
Corumbá, Mato Grosso do Sul, 2014.



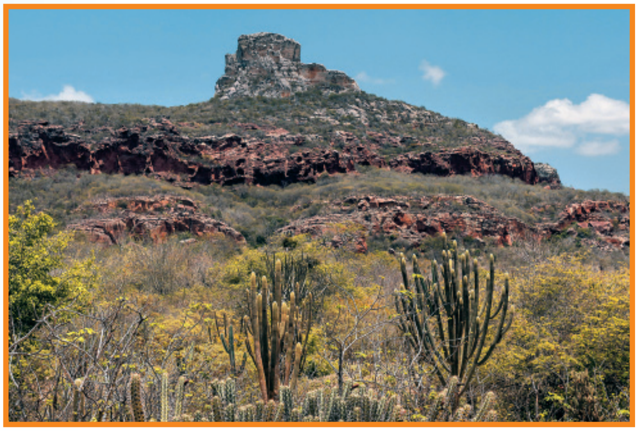
ZIG KOCH/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

Domínio das Pradarias
Refúgio da Vida Silvestre dos Campos de Palmas, Paraná, 2010.



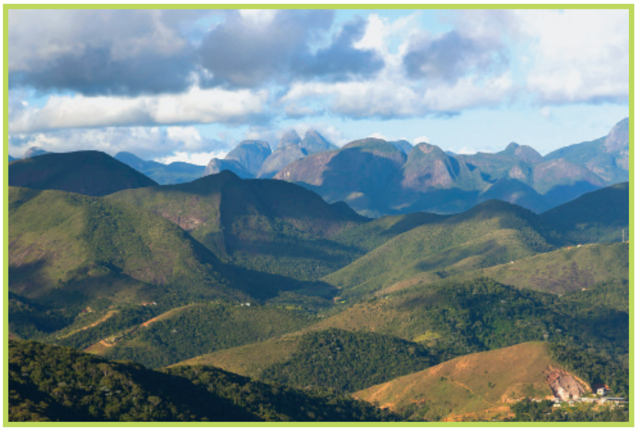
MARCOS ANDRÉ/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

Domínio dos Cerrados
Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso, 2013.



ANDRE DIB/PULSAR IMAGENS

Domínio das Caatingas
Parque Nacional do Catimbau, Buíque, Pernambuco, 2014.



ANDRE DIB/PULSAR IMAGENS

Domínio dos Mares de Morros
Morros do Parque Estadual dos Três Picos, Teresópolis,
Rio de Janeiro, 2015.

A atividade da seção *Faça você mesmo!* coloca o estudante como protagonista do aprendizado e propõe uma pesquisa sobre os diferentes aspectos dos biomas brasileiros, propiciando um bom momento para a contribuição de outros pontos de vista. Assim, essa atividade pode ser planejada e encaminhada integradamente à disciplina de Geografia.

Domínio Amazônico

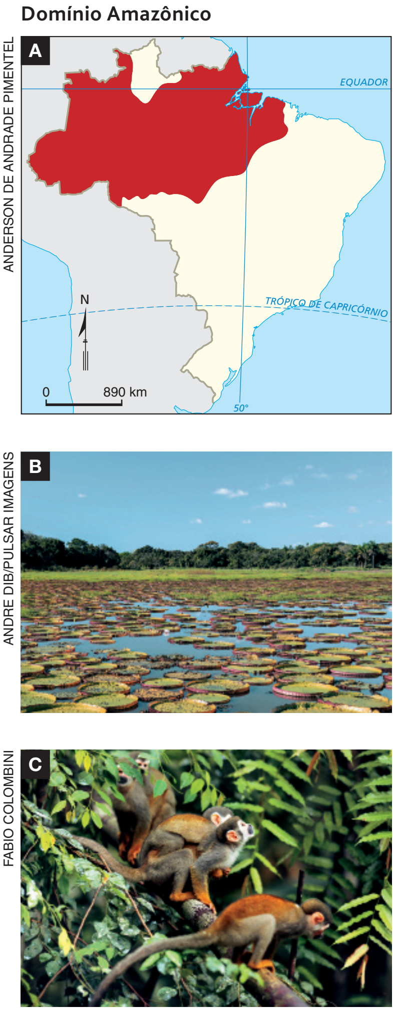
A **floresta amazônica**, também conhecida por **hileia amazônica**, é o principal bioma do Domínio Amazônico, segundo a classificação de Aziz Ab'Sáber. Esse domínio se localiza na região Norte do Brasil, nos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Tocantins, Amapá e Roraima, além da parte norte de Mato Grosso e da parte oeste do Maranhão. A qual bioma mundial o Domínio Amazônico pode ser relacionado? Veja nas páginas anteriores.

O clima da região amazônica reúne condições propícias ao desenvolvimento de um exuberante bioma do tipo floresta pluvial tropical, em que as precipitações pluviométricas anuais geralmente ultrapassam 1.800 mm, e a temperatura é estável no decorrer do ano, situando-se entre 25 °C e 28 °C.

Na floresta amazônica há diversos estratos ou andares formados pelas copas das árvores; o teto, ou dossel, localiza-se entre 30 m e 40 m acima do solo. Entre as árvores de grande porte da hileia amazônica destaca-se a castanheira-do-pará (*Bertholletia excelsa*), cujo tronco pode atingir até 4 m de diâmetro e 45 m de altura. Muitos gêneros de árvores, como *Virola* e *Pterocarpus*, têm raízes tabulares, capazes de fornecer maior apoio aos seus troncos gigantescos.

Uma das árvores mais típicas da região amazônica é a seringueira (*Hevea brasiliensis*), que pode atingir até 30 m de altura, com tronco de mais de 1 m de diâmetro. É da seringueira que se extrai o látex, do qual é fabricada a borracha natural. Embora a borracha sintética venha sendo cada vez mais utilizada, a exploração da borracha natural ainda é importante para a economia da região amazônica.

A floresta amazônica é rica em plantas epífitas, entre as quais se destacam grandes bromeliáceas. Nela vivem também epífitas das famílias das aráceas e begoniáceas, cujas raízes aéreas descem das árvores até o solo, constituindo densas cortinas de cipós. (Fig. 11.13)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

ANDRE DIB/PULSAR IMAGENS

FABIO COLOMBINI

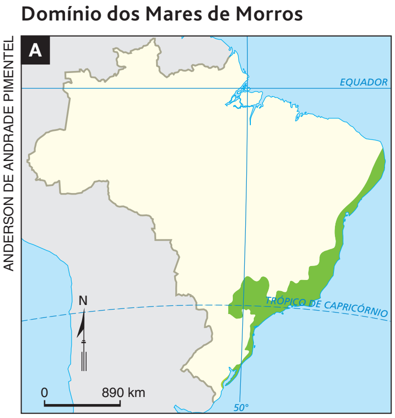
Figura 11.13 A. Localização do Domínio Amazônico no território brasileiro. (Elaborado com base em Ab'Sáber, A. N., 2003.) **B.** Lago com vitórias-régias (*Victoria amazonica*), cujas folhas flutuantes podem atingir 2,5 m de diâmetro (Poconé, MT, 2014). **C.** Macacos-de--cheiro da espécie *Saimiri sciureus*, que atingem cerca de 30 cm de comprimento.

Domínio dos Mares de Morros (ou Domínio Atlântico)

A **floresta pluvial costeira**, ou **floresta atlântica** (ou ainda **mata atlântica**), é o principal bioma dentro do domínio que Ab'Sáber classifica como Domínio dos Mares de Morros (ou Domínio Atlântico). Esse domínio se situa nas montanhas e planícies costeiras desde o Rio Grande do Norte até o Rio Grande do Sul. A região sul do Espírito Santo e de Cabo Frio, no Rio de Janeiro, são as únicas áreas onde esse bioma não se desenvolveu originalmente.

A floresta pluvial costeira tem árvores com folhas largas (latifoliadas) e perenes (perenifólias), como as da floresta amazônica. A altura média do andar superior oscila entre 30 m e 35 m, mas a vegetação é mais densa no andar arbustivo. Há grande diversidade de epífitas, como bromélias e orquídeas.

A floresta pluvial costeira é um dos biomas mais devastados pela exploração humana; calcula-se que restem apenas 5% da floresta original existente na ocasião da chegada dos primeiros colonizadores europeus. Extensas áreas de florestas pluviais costeiras foram totalmente destruídas, em muitos casos para dar lugar a plantações de cana-de-açúcar, cacau e banana. (Fig. 11.14)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

LUIZ CLÁUDIO MARIGO/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

Figura 11.14 A. Localização do Domínio dos Mares de Morros no território brasileiro. **B.** Área de floresta pluvial costeira da Reserva Natural Vale (Linhares, ES, 2008).

Domínio das Araucárias

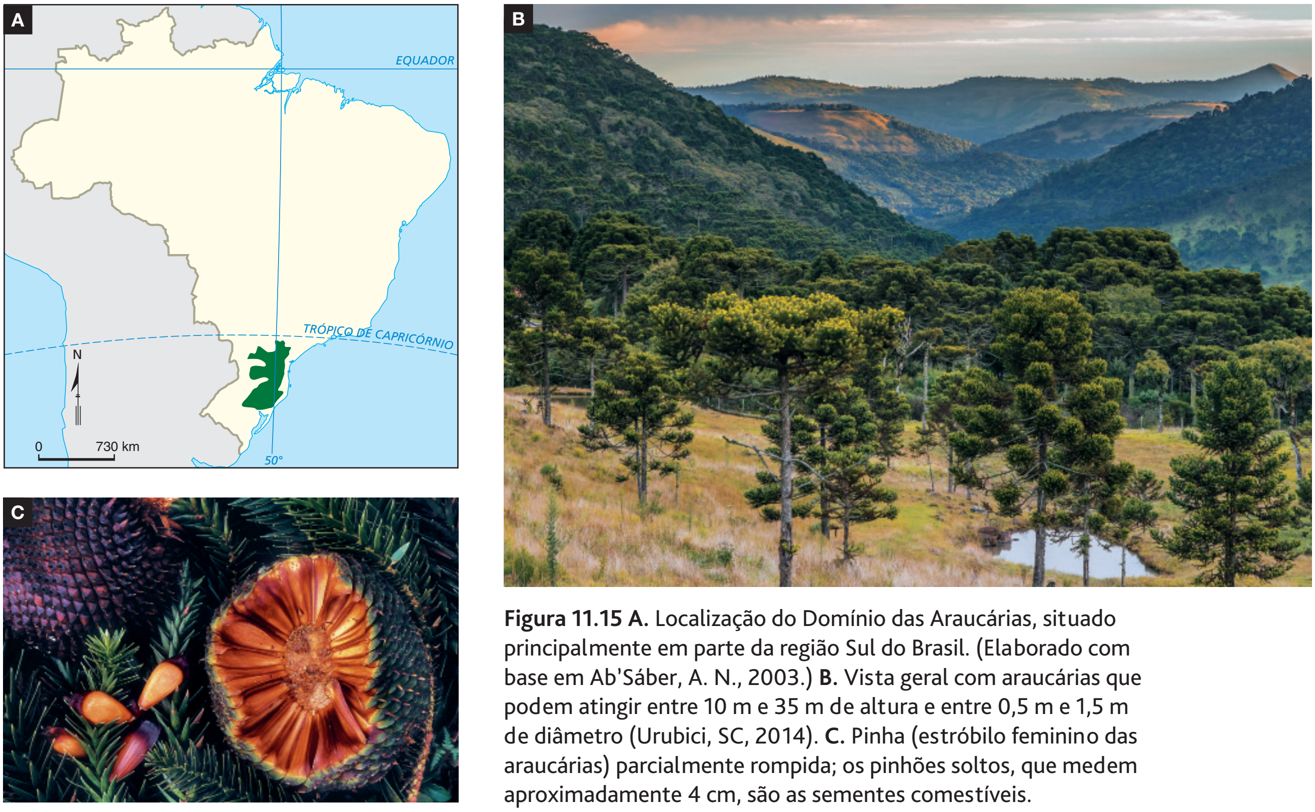
A **floresta de araucárias**, ou **mata de araucárias**, é o principal bioma do Domínio das Araucárias, segundo Ab'Sáber. Esse domínio se situa principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, em regiões com índices pluviométricos em torno de 1.400 mm anuais e temperaturas moderadas, com baixas significativas no inverno. Alguns autores referem-se a esse bioma como floresta subtropical mista.

A floresta de araucárias apresenta três andares vegetais bem definidos. O andar arbóreo é constituído principalmente pelas copas do pinheiro-do-paraná, também chamado de pinheiro-brasileiro (*Araucaria angustifolia*), e de pinheiros do gênero *Podocarpus*. O pinheiro-do-paraná, a popular araucária, é a árvore mais característica desse bioma e chega a atingir 25 m de altura, com tronco de até 1,5 m de diâmetro.

O andar arbustivo é muito denso, com diversos tipos de arbusto e samambaias arborescentes do gênero *Dicksonia*. As raízes dessas samambaias formam uma estrutura seca e compacta parecida com um tronco e constituem o xaxim, muito usado na fabricação de vasos. Apesar de ilegal, a exploração de xaxim continua acontecendo.

No andar herbáceo há epífitas, como orquídeas e bromélias, bem como gramíneas que formam uma vegetação rasteira. (Fig. 11.15)

Domínio das Araucárias



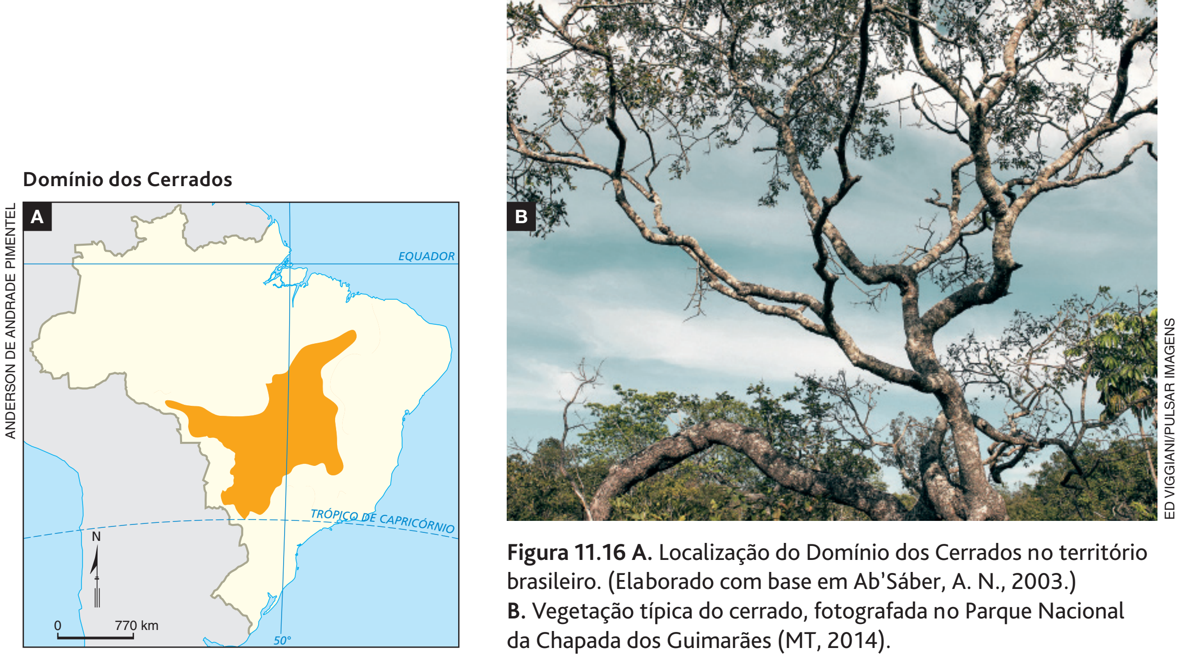
ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL
PALÊ ZUPPANI/PULSAR IMAGENS
FABIO COLOMBINI

Figura 11.15 A. Localização do Domínio das Araucárias, situado principalmente em parte da região Sul do Brasil. (Elaborado com base em Ab'Sáber, A. N., 2003.) **B.** Vista geral com araucárias que podem atingir entre 10 m e 35 m de altura e entre 0,5 m e 1,5 m de diâmetro (Urubici, SC, 2014). **C.** Pinha (estróbilo feminino das araucárias) parcialmente rompida; os pinhões soltos, que medem aproximadamente 4 cm, são as sementes comestíveis.

Domínio dos Cerrados

O **cerrado** é o principal bioma dentro do que Ab'Sáber denomina Domínio dos Cerrados. Esse domínio se situa nos estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Piauí, Maranhão, São Paulo e Paraná. Há também algumas "ilhas" dessa formação na região amazônica.

Cobrindo uma área de aproximadamente 2 milhões de km^2, o cerrado é o segundo maior bioma brasileiro. Sua fisionomia varia nas diferentes regiões, apresentando desde formas campestres bem abertas, como os campos limpos, até formas relativamente densas, florestais, como os cerradões, havendo entre esses dois extremos uma variedade de aspectos fisionômicos. O cerrado também é um dos biomas brasileiros bastante ameaçados pela ação antrópica; quase 40% de sua área original foi desmatada para exploração de recursos naturais, principalmente na segunda metade do século XX. A vegetação do cerrado deu lugar a pastagens para a criação de gado bovino e a culturas agrícolas, sobretudo de soja. (Fig. 11.16)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

ED VIGGIANI/PULSAR IMAGENS

Figura 11.16 A. Localização do Domínio dos Cerrados no território brasileiro. (Elaborado com base em Ab'Sáber, A. N., 2003.)
B. Vegetação típica do cerrado, fotografada no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (MT, 2014).

O cerrado é um tipo de savana, com vegetação arbórea formada por pequenas árvores e arbustos, muitos deles com troncos retorcidos e cascas espessas. O clima desse bioma é relativamente quente, com temperatura média anual por volta de 26 °C e índices pluviométricos entre 1.100 mm e 2.000 mm por ano, com chuvas concentradas no verão. Veja, nas páginas anteriores, a distribuição do bioma savana em nosso planeta.

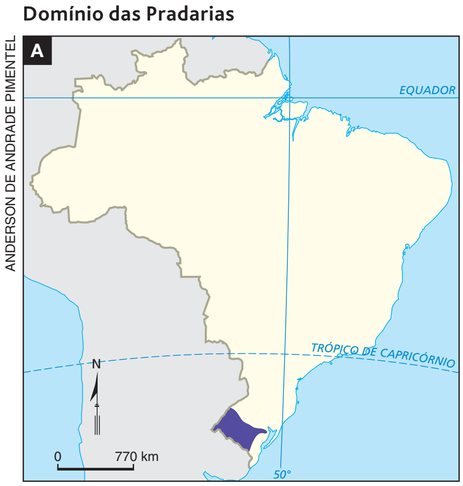
Na estação das chuvas, o solo do cerrado fica relativamente rico em gramíneas, que desaparecem na época de estiagem. As árvores mais comuns são o ipê (*Tabebuia* sp.), a peroba-do-campo (*Aspidosperma tomentosum*) e a caviúna (*Dalbergia* sp.).

Diversos estudos indicam que a fisionomia típica da vegetação do cerrado parece ser fortemente influenciada pelas características minerais do solo e por incêndios naturais periódicos. Estes explicam o fato de diversas espécies de plantas do cerrado apresentarem adaptações ao fogo, como gemas subterrâneas, troncos revestidos por grossa periderme, sementes com germinação induzida pelo calor etc.

Domínio das Pradarias

Segundo Aziz Ab'Sáber, os **campos** brasileiros – o **pampa** – compõem o Domínio das Pradarias. A palavra "pampa" significa planície na língua indígena quíchua, ainda falada por povos da Cordilheira dos Andes. O pampa ocupa áreas de planície, localiza-se principalmente no sul do Rio Grande do Sul e caracteriza-se pela predominância de gramíneas. Eventualmente, pode abrigar pequenos bosques de arbustos, mas que são formações isoladas, não chegando a quebrar a homogeneidade do bioma. Confira, nas páginas anteriores, a distribuição do bioma pradaria em nosso planeta.

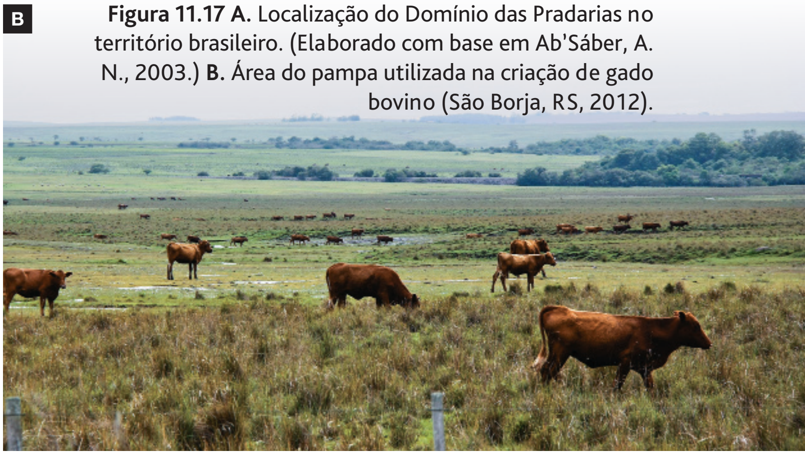
O índice de chuvas no pampa encontra-se geralmente entre 500 mm e 1.000 mm anuais. A temperatura varia de acordo com a estação: no inverno situa-se entre 10 °C e 14 °C; no verão, entre 20 °C e 23 °C. A maior parte da vegetação original do pampa foi destruída para dar lugar a áreas cultiváveis. (Fig. 11.17)



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

GERSON GERLOFF/PULSAR IMAGENS

Figura 11.17 A. Localização do Domínio das Pradarias no território brasileiro. (Elaborado com base em Ab'Sáber, A. N., 2003.) **B.** Área do pampa utilizada na criação de gado bovino (São Borja, RS, 2012).



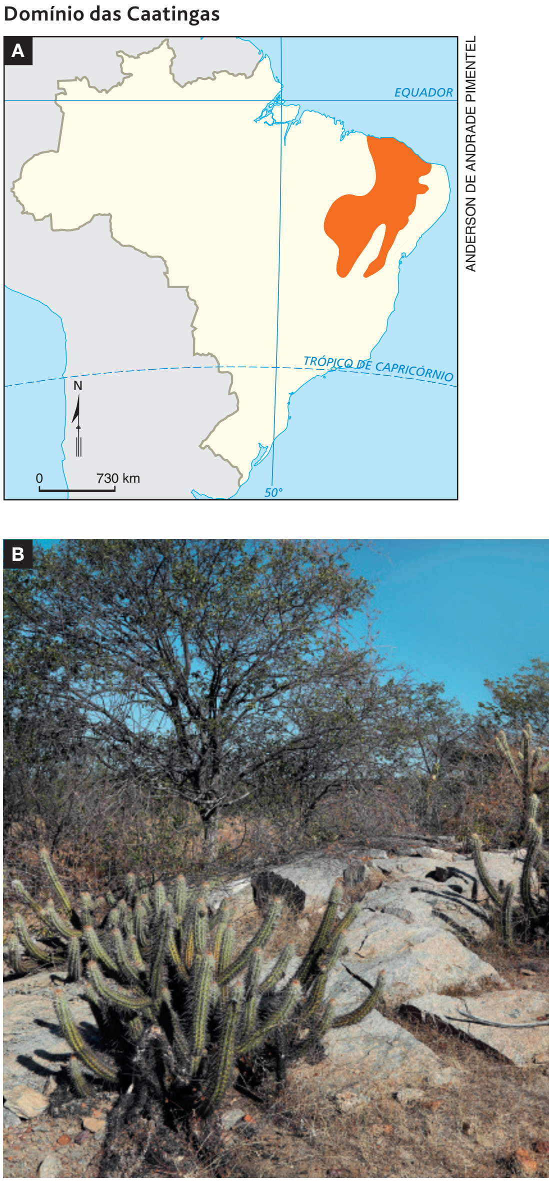
Domínio das Caatingas

A **caatinga** é o principal bioma do Domínio das Caatingas. Esse domínio ocupa cerca de 10% do território brasileiro, estendendo-se pelos estados de Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia e pelo norte de Minas Gerais.

Os índices pluviométricos da caatinga são baixos, em torno de 500 mm a 700 mm anuais. Em certas regiões do Ceará, por exemplo, a média para os anos chuvosos é de 1.000 mm, mas pode chegar a chover apenas 200 mm nos anos mais secos. A temperatura situa-se entre 24 °C e 26 °C, variando pouco ao longo do ano. Além das condições climáticas rigorosas, a região da caatinga apresenta ventos fortes e secos, que contribuem para a aridez da paisagem nos meses de seca.

A vegetação da caatinga é composta de plantas com adaptações marcantes ao clima seco, como folhas modificadas em espinhos, revestimentos altamente impermeáveis, caules que armazenam água etc. Essas adaptações compõem o aspecto característico das plantas da caatinga, o que se denomina **xeromorfismo** (do grego *xeros*, seco, e *morphos*, forma, aspecto).

Entre as plantas cactáceas, as mais expressivas são o mandacaru (*Cereus* sp.) e o xiquexique (*Pilocereus* sp.). Há também arbustos e árvores baixas como mimosas, acácias e amburanas (leguminosas); a maioria delas perde as folhas na estação das secas (são caducifólias), o que confere à caatinga seu aspecto típico, espinhoso e agreste. Entre as poucas espécies da caatinga que não perdem as folhas na época da seca, destaca-se o juazeiro (*Zizyphus joazeiro*), uma das plantas mais típicas desse bioma. (Fig. 11.18)


Domínio das Caatingas

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

FABIO COLOMBINI

Figura 11.18 A. Localização do Domínio das Caatingas no território brasileiro. (Elaborado com base em Ab'Sáber, A. N., 2003.) **B.** Vegetação da caatinga (região de Caicó, RN, 2014).

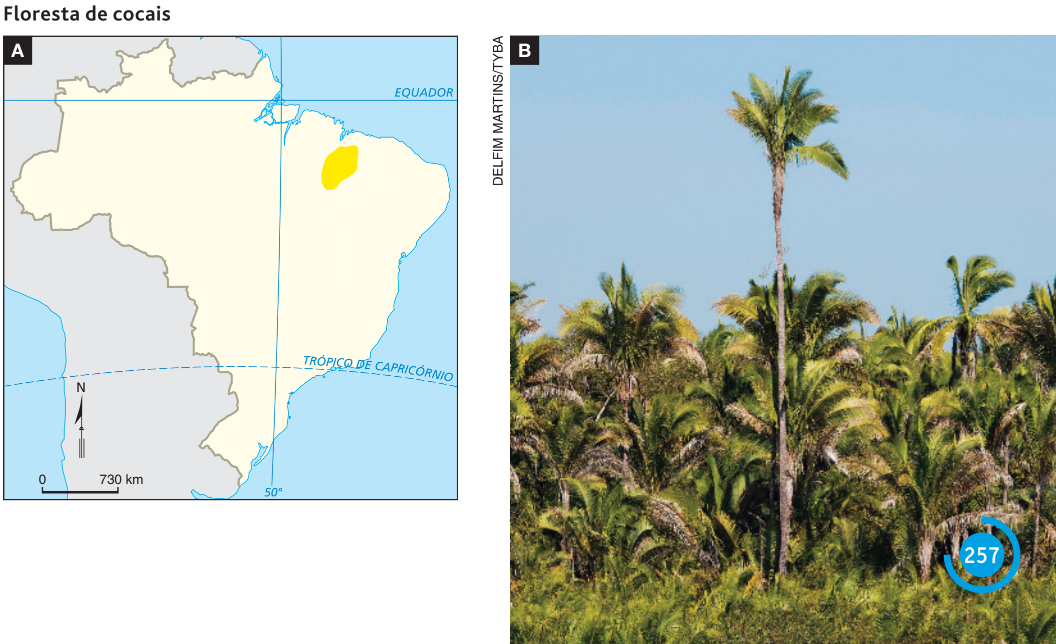
Principais biomas das áreas de transição

Floresta de cocais

A **floresta de cocais**, ou **mata de cocais** ou, ainda, **babaçual**, localiza-se principalmente em certas áreas dos estados do Maranhão e Piauí; sua espécie vegetal típica é a palmeira *Orbignya martiana*, o babaçu.

A região onde ocorre a mata de cocais tem índice elevado de chuvas, entre 1.500 e 2.200 mm por ano, e temperatura média anual de 26 °C. Um aspecto interessante desse bioma é que o solo permanece úmido o ano todo porque o lençol freático é pouco profundo.

O babaçu tem importância econômica para as populações locais; das sementes da palmeira extrai-se óleo, e as folhas são utilizadas para a cobertura de casas e para a fabricação de utensílios domésticos. (Fig. 11.19)


Floresta de cocais

ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

DELFIM MARTINS/TYBA

Figura 11.19 A. Principal localização da floresta de cocais (ou babaçual), formada principalmente pela palmeira chamada babaçu (*Orbignya martiana*). **B.** Babaçus em trecho de floresta de cocais (Nazária, PI, 2015).

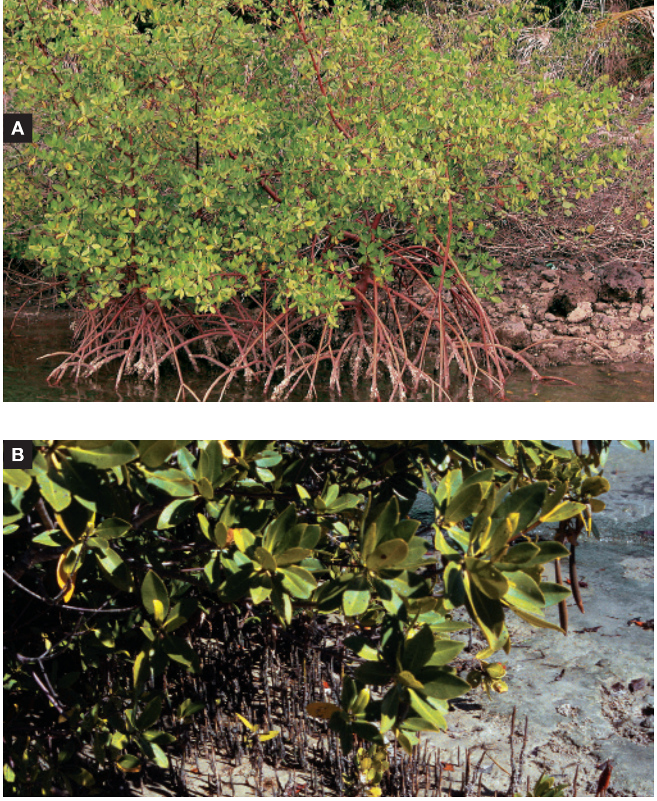
Manguezal

O **manguezal**, ou **mangue**, é um bioma litorâneo presente em regiões de solo lodoso e salgado. É encontrado nas desembocaduras de rios e em áreas protegidas da ação direta do mar, como baías de águas paradas ou litorais guarnecidos por diques de areia. Durante a maré cheia, o solo do mangue fica coberto por água salobra.

Os manguezais estendem-se por toda a costa brasileira, exceto nas regiões de litoral rochoso. Há mangues bem desenvolvidos no Pará, Amazonas, Maranhão, Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná.

Na maioria dos mangues, há três tipos de vegetação arbórea: *Rhizophora mangle*, popularmente conhecida como “mangue-bravo”, *Laguncularia racemosa*, popularmente chamada “mangue-manso”, e espécies do gênero *Avicennia*. (Fig. 11.20)

Manguezais são regiões altamente produtivas e economicamente importantes para as populações caiçaras que vivem em suas proximidades. A alta disponibilidade de nutrientes minerais e de matéria orgânica faz do mangue um local para alimentação de diversas espécies de animais marinhos e para a espécie humana. Grande número de peixes, moluscos e crustáceos, além de aves, obtém alimento, direta ou indiretamente, dos manguezais.



MARCIO LOURENÇO/PULSAR IMAGENS

ADSTOCK RF/DIOMEDIA

Figura 11.20 A. Mangue-bravo (*Rhizophora mangle*) com rizóforos, ramos que funcionam como escoras (Rio Piraquê-Açu, ES, 2003). **B.** Plantas do gênero *Avicennia* com raízes especiais denominadas pneumatóforos, que crescem eretas e emergem do solo alagado, garantindo a obtenção do gás oxigênio necessário à respiração das raízes.

Pantanal Mato-Grossense

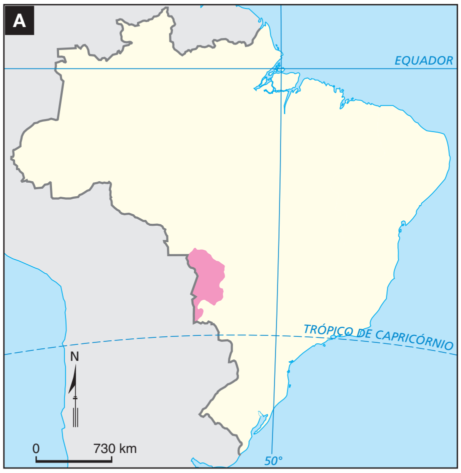
O **Pantanal Mato-Grossense**, ou **Complexo do Pantanal**, é um mosaico de diferentes biomas, sendo considerado uma das principais áreas de transição entre os domínios morfoclimáticos brasileiros. É uma grande planície com partes mais elevadas denominadas impropriamente de “cordilheiras”. As partes mais baixas são inundadas durante as cheias periódicas dos rios que cortam a região. Na estação entre as cheias, restam lagoas de água doce, onde se concentram jacarés, diversas espécies de peixes e outros animais de hábitos aquáticos. (Fig. 11.21)

Poucos locais no mundo têm uma comunidade biológica tão exuberante quanto a do Pantanal Mato-Grossense. Essa vasta planície inundável abriga uma das mais ricas reservas de vida selvagem do planeta. A fauna aquática é muito variada, com moluscos, crustáceos e centenas de espécies de peixes, entre eles o dourado, o pacu, o jaú, o pintado, o surubim, os lambaris e as piranhas.

Em território brasileiro, o Pantanal ocupa a parte oeste dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, estendendo-se pelo Paraguai, Bolívia e Argentina.

A caça e a pesca predatórias colocam em risco os biomas do Pantanal. O mercado de peles, especialmente de jacarés, onças, jaguatiricas, ariranhas e lontras, além da captura de aves raras, coloca diversas espécies em risco de extinção. Além da destruição causada pelo garimpo ilegal, há também grande pressão econômica para transformar regiões florestais do Pantanal em propriedades agrícolas.

Pantanal Mato-Grossense



ANDERSON DE ANDRADE PIMENTEL

Figura 11.21
A. Localização do Pantanal Mato-Grossense no território brasileiro.
B. Área alagada do Pantanal (Mato Grosso do Sul, 2010).

ZIG KOCH/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

11.4 Ecossistemas aquáticos

Ecossistemas marinhos

Os mares e oceanos cobrem mais de 75% da superfície de nosso planeta, com profundidades que variam de alguns metros, nas regiões litorâneas, a mais de 11 km, nas zonas mais profundas. Um dos aspectos mais marcantes do ambiente marinho é sua grande estabilidade e homogeneidade no que se refere à composição química e temperatura. A salinidade dos mares é de cerca de 3,5 g/L de sais, com predominância de cloreto de sódio ($NaCl$).

É possível distinguir dois grandes domínios marinhos: um relativo ao assoalho, ou seja, ao fundo dos mares, o **domínio bentônico**, e outro relativo às massas de água, o **domínio pelágico**.

A luz consegue penetrar na água do mar até a profundidade máxima de aproximadamente 200 m, estabelecendo o que se denomina **zona fótica** (do grego *photos*, luz). Abaixo dos 200 m de profundidade não há luz, e essa região escura é denominada **zona afótica**. Na metade superior da zona fótica vive o fitoplâncton marinho, formado por algas e bactérias fotossintetizantes que produzem praticamente todo o alimento necessário à manutenção da vida nos mares. Há também plâncton não fotossintetizante e grandes cardumes.

A região que se estende dos 200 m aos 2.000 m de profundidade é a **região batial**. Suas águas são frias e pobres em fauna. Os peixes, moluscos e alguns outros animais que vivem nesse local são sustentados pela matéria orgânica proveniente da superfície. Mais abaixo encontra-se a **região abissal**, que se estende dos 2.000 m aos 6.000 m de profundidade. Nela são conhecidas poucas espécies de organismos, que chamam atenção por suas características exóticas, como peixes bioluminescentes e lulas-gigantes.

A região mais profunda dos oceanos, abaixo de 6.000 m, é a **região hadal**. Sua fauna ainda é pouco conhecida e, pelo que se sabe, constituída principalmente por esponjas e moluscos. (Fig. 11.22)

Os organismos que habitam os mares podem ser classificados em três grandes grupos: plâncton, bentos e nécton.

O **plâncton** (do grego *plankton*, errante) é constituído por seres flutuantes, isto é, que flutuam ao sabor das correntezas. Embora haja organismos planctônicos capazes de executar movimentos próprios, nadando ativamente, eles não conseguem superar a força das correntes, sendo carregados por elas.

Como já foi comentado, o plâncton é subdividido em plâncton fotossintetizante (fitoplâncton) e plâncton não fotossintetizante (zooplâncton). O primeiro é representado por organismos produtores, principalmente algas microscópicas (em sua maioria, diatomáceas e dinoflagelados) e bactérias fotossintetizantes. O plâncton não fotossintetizante é representado por organismos consumidores como foraminíferos (protozoários), crustáceos e cnidários, além de larvas de moluscos, equinodermos, anelídeos e peixes.

O **bentos** (do grego *benthos*, fundo do mar) é constituído de organismos relacionados ao fundo marinho. Os organismos bentônicos podem ser sésseis, denominação que se aplica aos seres que vivem fixados ao fundo, ou errantes, denominação dos seres bentônicos que se deslocam sobre o fundo. O bentos séssil é representado por algas macroscópicas e por animais como esponjas, cnidários e certos anelídeos. O bentos errante é representado principalmente por crustáceos (camarões, caranguejos e lagostas), equinodermos (ouriços-do-mar, holotúrias e estrelas-do-mar) e também por moluscos (caramujos e polvos). Os animais bentônicos geralmente se alimentam de cadáveres e detritos orgânicos, embora haja representantes carnívoros que caçam ativamente suas presas.

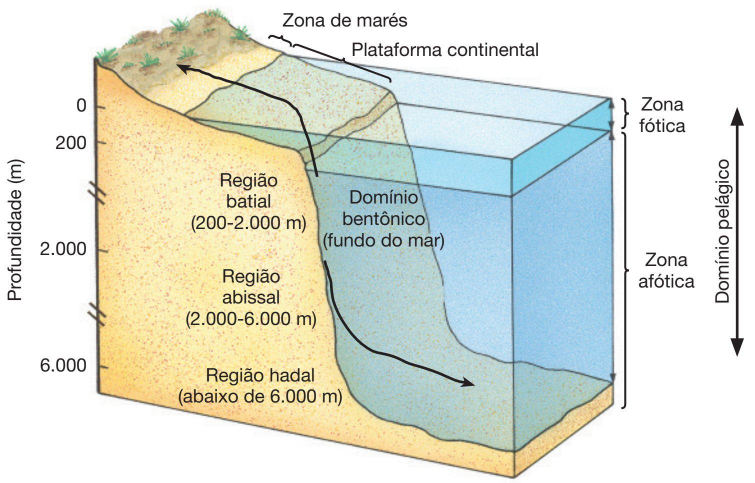
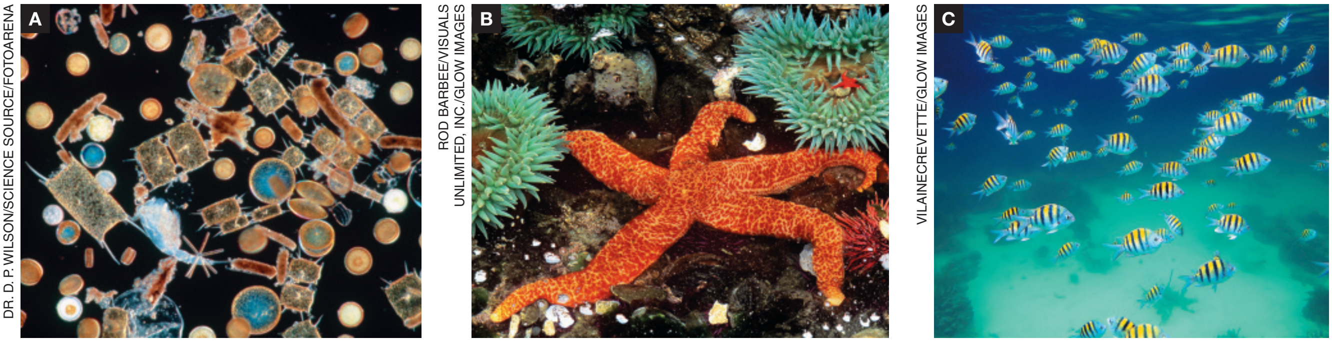

Zona de marés
Plataforma continental
Profundidade (m)
0
200
2.000
6.000
Região batial (200-2.000 m)
Domínio bentônico (fundo do mar)
Região abissal (2.000-6.000 m)
Região hadal (abaixo de 6.000 m)
Zona fótica
Zona afótica
Domínio pelágico

Figura 11.22 Representação esquemática das principais regiões marinhas. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

O **nécton** (do grego *nektos*, apto a nadar) é constituído por organismos que se deslocam ativamente na água e não estão à mercê das correntezas. Fazem parte desse grupo a maioria dos peixes, as baleias, os golfinhos, certos crustáceos (camarões) e alguns moluscos (lulas e sépias). (Fig. 11.23)



DR. D. P. WILSON/SCIENCE SOURCE/FOTOARENA

ROD BARBEE/VISUALS UNLIMITED, INC./GLOW IMAGES

VILAINECREVETTE/GLOW IMAGES

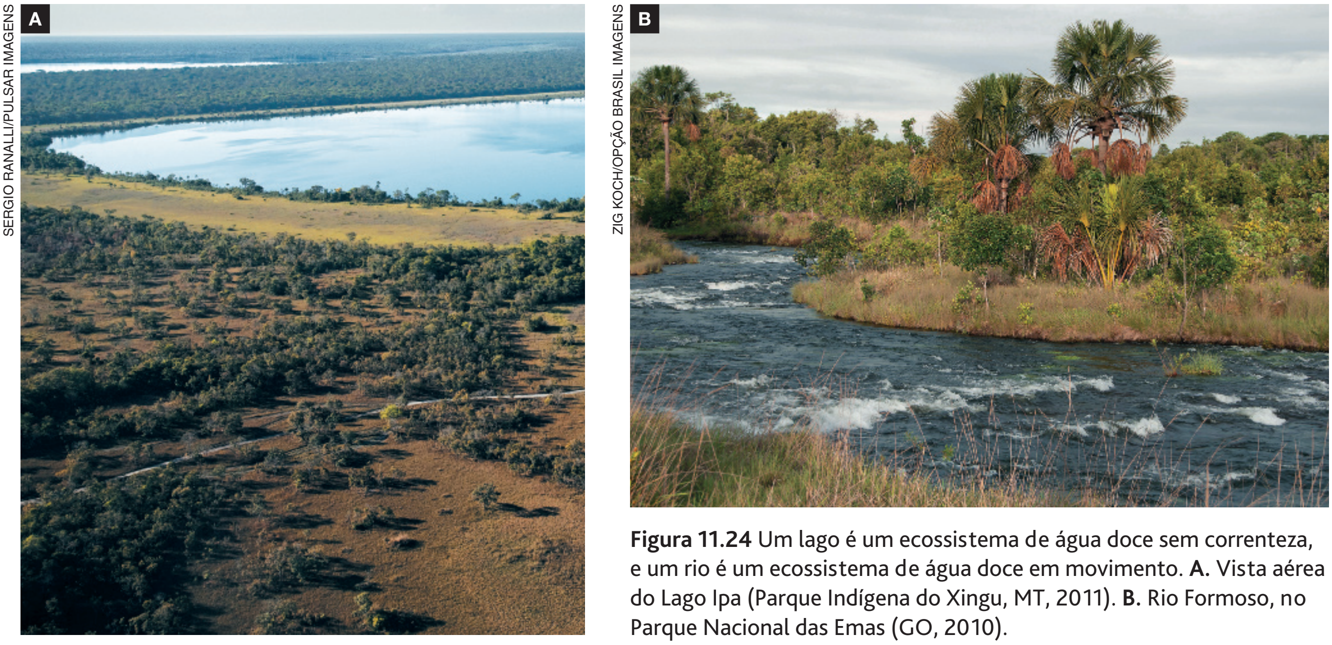
Figura 11.23 A. Fotomicrografia de fitoplâncton ou plâncton fotossintetizante. (Microscópio fotônico; aumento ≈ 40×.) **B.** Estrela-do-mar do gênero *Pisaster*, que pode atingir 70 cm de um braço a outro, e anêmonas da espécie *Anthopleura xanthogrammica*, que podem atingir 25 cm de diâmetro, exemplos de animais bentônicos. **C.** Cardume de sargentos (*Abudefduf saxatilis*), que geralmente medem de 8 cm a 15 cm (Costa Rica, 2012); os peixes são os representantes mais típicos do nécton.

Ecossistemas de água doce

Uma característica importante que distingue os dois tipos de ecossistemas de água doce é se a água é parada, como ocorre nos lagos, lagoas e charcos, ou se está em movimento, como nos rios, riachos e corredeiras. Lagos, lagoas e charcos geralmente apresentam maior biodiversidade que os ecossistemas de águas em movimento. Nas águas paradas, os produtores são organismos fotossintetizantes representados tanto por plantas que vivem parcial ou totalmente submersas quanto pelo plâncton fotossintetizante ou fitoplâncton, constituído por uma diversidade de seres microscópicos como algas verdes, cianobactérias e diatomáceas, que flutuam próximo à superfície.

O fitoplâncton serve de alimento ao plâncton não fotossintetizante ou zooplâncton, constituído por microcrustáceos, protozoários e larvas de diversos organismos. Os habitantes de maior porte dos ecossistemas de águas paradas são os peixes. Os maiores ecossistemas lacustres do mundo são o Lago Baikal, localizado na Sibéria, e o Lago Tanganica, na África.

Os ecossistemas de águas em movimento apresentam pouco plâncton. Seus habitantes são principalmente algas fixadas a rochas e também moluscos, insetos e peixes, que dependem de alimento proveniente das margens. (Fig. 11.24)



SERGIO RANALLI/PULSAR IMAGENS

ZIG KOCH/OPÇÃO BRASIL IMAGENS

Figura 11.24 Um lago é um ecossistema de água doce sem correnteza, e um rio é um ecossistema de água doce em movimento. **A.** Vista aérea do Lago Ipa (Parque Indígena do Xingu, MT, 2011). **B.** Rio Formoso, no Parque Nacional das Emas (GO, 2010).

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. A sucessão ecológica caracteriza-se 1. b

a) pela introdução, em uma comunidade, de uma espécie bem-sucedida em outro ecossistema.
b) pela colonização de um ambiente com sucessivas mudanças nas comunidades biológicas.
c) pelo fim do processo evolutivo da comunidade biológica, com extinção da maioria das espécies, incluindo as pioneiras.
d) pelo grande sucesso ecológico de uma espécie na comunidade.

2. O termo “espécie pioneira” 2. b

a) aplica-se apenas a espécies que colonizam ambientes antes ocupados por seres vivos.
b) aplica-se às espécies capazes de iniciar a colonização de um local desabitado.
c) não se aplica a espécies vegetais, mas apenas a liquens e fungos.
d) refere-se àquelas espécies que se extinguem primeiro na comunidade biológica.

3. Uma comunidade estável que se estabelece em uma região após um processo de sucessão é 3. c

a) sempre uma floresta.
b) sempre uma savana.
c) sempre uma comunidade clímax.
d) uma sucessão primária.
e) uma sucessão secundária.

4. Qual das alternativas a seguir traz uma associação **incorreta**? 4. a

a) Pradaria – Plantas epífitas.
b) Deserto – Xeromorfismo.
c) Floresta temperada – Árvores caducifólias.
d) Tundra – Seca fisiológica.

5. Exemplos de organismos pioneiros, capazes de colonizar ambientes inóspitos, são 5. c

a) coníferas e musgos.
b) fungos e mamíferos.
c) gramíneas e liquens.
d) musgos e insetos.

6. Uma diferença entre sucessão primária e sucessão secundária é 6. a

a) o tipo de ambiente existente no início da sucessão.
b) o tipo de comunidade clímax que se estabelece em cada caso.
c) o tempo de duração da sucessão, mais rápido na sucessão primária.
d) o fato de a sucessão secundária levar a menor biodiversidade.

7. Zebras pastavam gramíneas quando foram atacadas por um bando de leões. Em que bioma isso deve ter ocorrido? 7. d

a) Deserto.
b) Floresta tropical.
c) Floresta temperada.
d) Savana.
e) Tundra.

8. A popular seringueira *Hevea brasiliensis* é típica de qual bioma? 8. c

a) Caatinga.
b) Cerrado.
c) Floresta amazônica.
d) Mata atlântica.
e) Mata de cocais.

9. Qual dos biomas a seguir tem maiores semelhanças com a floresta pluvial costeira? 9. c

a) Caatinga.
b) Cerrado.
c) Floresta amazônica.
d) Mata de araucárias.
e) Mata de cocais.

10. Um bioma brasileiro do tipo savana tem aspecto ressecado e pequenas árvores e arbustos retorcidos. Essas características são mais influenciadas pela composição do solo do que pela falta de chuvas. Está-se falando de 10. b

a) caatinga.
b) cerrado.
c) floresta amazônica.
d) mata atlântica.
e) mata de cocais.

11. O xeromorfismo constitui uma série de adaptações das plantas à seca. Plantas altamente xeromórficas são encontradas no bioma denominado 11. a

a) caatinga.
b) cerrado.
c) floresta amazônica.
d) mata atlântica.
e) mata de cocais.

12. Caules-escora e raízes respiratórias (pneumatóforos) são adaptações ao solo encharcado, salgado e pouco consistente do bioma conhecido como 12. e

a) caatinga.
b) cerrado.
c) mata atlântica.
d) floresta amazônica.
e) manguezal.

Associe cada uma das alternativas a seguir às questões de 13 a 16.

a) bentos
b) nécton
c) fitoplâncton
d) zooplâncton

13. Larvas de ostras e microcrustáceos pertencem ao (▬). 13. d

14. Diatomáceas, dinoflagelados e algas verdes pertencem ao (▬). 14. c

15. Estrelas-do-mar e vermes poliquetos pertencem ao (▬). 15. a

16. O tubarão é um representante do (▬). 16. b

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

17. Durante a sucessão ecológica rumo ao clímax, ocorrem modificações expressivas em relação aos seguintes fatores:

a) biomassa das comunidades que se sucedem;
b) diversidade em espécies;
c) número de nichos ecológicos disponíveis;
d) dependência do microclima em relação ao clima regional.

Sua tarefa é retomar o texto de abertura sobre a sucessão ecológica na ilha de Rakata, analisando-o agora quanto aos fatores que se alteram na sucessão, mencionados acima. Sua produção final poderá ser um texto ou mesmo um diagrama ilustrado que interligue o caso particular de Rakata a conceitos e princípios gerais da sucessão ecológica.

18. Como foi mostrado no capítulo, o Brasil apresenta uma das maiores biodiversidades do mundo, distribuída em grande variedade de biomas, incluídos em seis domínios morfoclimáticos principais. Estamos próximos ou fazemos parte de algum bioma natural, visitamos outros ao viajar, mas, na maioria das vezes, nem pensamos nisso. Nesta atividade, a proposta é pensar nos biomas que conhecemos pessoalmente. Por exemplo, você mora em Cuiabá, em Mato Grosso, e visita um primo em Quixeramobim, no Ceará. Com quais biomas naturais tem contato? Repasse os domínios morfoclimáticos brasileiros estudados no capítulo e tente lembrar de algo que já vivenciou em relação a plantas, animais, ambiente etc. em cada local que conhece pessoalmente. Pesquise que tipos de biomas ocorrem no município em que você mora. O bioma original está preservado? Compartilhe com os colegas fotografias de biomas que você conhece e dos lugares que visitou por meio de aplicativos de mensagem. Inclua suas impressões pessoais sobre cada imagem.

19. Muitos ecossistemas têm sofrido agressões em função da superexploração econômica e da ignorância a respeito da importância de sua preservação. Preocupadas com esse problema, existem atualmente diversas entidades que se dedicam à educação ambiental e à recuperação de ecossistemas ameaçados, como é o caso dos manguezais. Pesquise a importância dos mangues para organismos diversos e a relação das populações humanas com esses ecossistemas, levantando os impactos causados e as ações que têm sido adotadas para sua preservação e ocupação sustentável. Resuma as informações coletadas e apresente-as para a classe na forma de um cartaz ilustrado de forma a evidenciar a importância da preservação dos mangues.

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

20. Pesquisa: Grandes biomas brasileiros

Forme um grupo com seus colegas de classe. Cada grupo ficará responsável por pesquisar sobre um dos grandes biomas do Brasil. Não se atenha às informações referentes à Biologia; busque informações também em atlas e no seu livro de Geografia, que pode apresentar dados econômicos e socioculturais muito relevantes. Os resultados da pesquisa de sua classe podem ser apresentados a toda a escola, na forma de murais, painéis, jornais, seminários etc.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questão objetiva

1. (UFSCar-SP) A substituição ordenada e gradual de uma comunidade por outra, até que se chegue a uma comunidade estável, é chamada sucessão ecológica. Nesse processo, pode-se dizer que o que ocorre é 1. e

a) a constância de biomassa e de espécies.
b) a redução de biomassa e maior diversificação de espécies.
c) a redução de biomassa e menor diversificação de espécies.
d) o aumento de biomassa e menor diversificação de espécies.
e) o aumento de biomassa e maior diversificação de espécies.

Questões discursivas

2. (Unicamp-SP) Um botânico estudou intensivamente a vegetação nativa do Nordeste brasileiro e descobriu duas espécies novas (W e Z). A espécie W é uma árvore perenifólia, com pouco mais de 25 m de altura, tronco com casca lisa e folhas com ápice longo e agudo. A espécie Z tem caule achatado e verde (clorofilado), folhas reduzidas a espinhos e altura máxima de 3 m.

a) Com base nessas informações, indique em que tipo de formação vegetal o botânico encontrou cada uma das espécies novas.
b) Indique uma característica ambiental específica de cada uma das formações vegetais onde ocorrem as espécies W e Z.

3. (UFC-CE) O processo de sucessão ecológica compreende uma série de estágios do desenvolvimento de uma comunidade. Com relação a esse fenômeno:

a) estabeleça a diferença entre a sucessão primária e a sucessão secundária;
b) explique o significado do termo “comunidade clímax”.

Capítulo 12 A humanidade e o ambiente

PALÁCIO DO ANHANGABAÚ

JOÃO WAINER/FOLHAPRESS

"Ecotelhado" no prédio da prefeitura da cidade de São Paulo (SP, 2004): uma pequena ação pela sustentabilidade.

Por uma humanidade sustentável

A humanidade agride a natureza e, por isso, está a caminho da autodestruição? Nos meios de comunicação, as opiniões a esse respeito são contraditórias. A maioria dos estudiosos consultados acredita que nossa espécie tem causado danos irreparáveis ao planeta. Entretanto, para alguns (geralmente ligados a interesses econômicos), os alertas dos ambientalistas são exagerados e a humanidade saberá solucionar os problemas que surgirem. Quem tem razão? Haverá riscos reais de catástrofes provocadas pela poluição, pela degradação ambiental ou pelo esgotamento de recursos naturais?

Vamos aos fatos: nos dois últimos séculos, o desenvolvimento da sociedade industrial e o crescimento da população humana têm causado impactos ambientais sem precedentes. Eis algumas das principais ameaças ao planeta: poluição; aumento da temperatura global; destruição da camada de ozônio; esgotamento de fontes de energia e de outros recursos naturais; extinção de espécies. Isso se deve principalmente à explosão populacional humana e aos modelos vigentes de desenvolvimento industrial e tecnológico, implementados pelo progresso científico.

Devemos lembrar que nossa espécie, assim como as outras espécies animais, necessita explorar os recursos do ambiente: temos de comer outros seres vivos para obter energia e matérias-primas, sem as quais não poderíamos sobreviver. Além disso, precisamos combater as espécies que nos causam doenças (bactérias, fungos, vermes, insetos etc.) e também as que disputam conosco o alimento, como parasitas e pragas que atingem nossas lavouras.

Os assuntos abordados no capítulo poderiam ser trabalhados com as disciplinas de Física, Química, Geografia e História, apenas para mencionar aquelas com as quais a possibilidade de integração é mais direta.

Entretanto, para poder desfrutar de uma longa vida na Terra, a humanidade precisa encontrar formas equilibradas de convívio com a natureza e de exploração dos recursos naturais. O grande desafio do século XXI é considerar os limites da capacidade de suporte do ambiente (relembre esse conceito no capítulo 9) e ter consciência de nossa relação com a natureza, principalmente no que diz respeito aos recursos que utilizamos e ao destino que damos aos resíduos produzidos. Só assim poderemos amenizar o impacto sobre o ambiente e garantir um mundo habitável para as próximas gerações. Esse é o princípio básico do desenvolvimento sustentável, que estudaremos neste capítulo.

A importância do assunto

Nas últimas décadas, cada vez mais pessoas têm percebido a necessidade do uso racional dos recursos naturais, de maneira a garantir um mundo habitável para as próximas gerações.

Neste capítulo, tratamos de alguns aspectos problemáticos da relação entre seres humanos e natureza. Aprendendo mais sobre esses temas, damos um passo importante para nosso futuro. É importante refletir sobre a proteção e a conservação ambiental, e contribuir para a construção de uma sociedade mais equilibrada. A proteção e a restauração dos ecossistemas naturais devem ser prioridade de todos os povos da Terra.

Nesse contexto, a Ecologia torna-se imprescindível, uma vez que, para desenvolver estratégias globais de utilização dos recursos naturais, é fundamental conhecer a composição e o funcionamento dos ecossistemas. Cuidar do planeta é, hoje, uma responsabilidade de todos os cidadãos do mundo.

12.1 O conceito de desenvolvimento sustentável

Antes de trabalhar o tema de sustentabilidade com os estudantes, verifique o que eles sabem sobre o assunto e quais atitudes poderiam ser consideradas sustentáveis.

A constatação dos danos ambientais resultantes do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico tem levado a humanidade a repensar seu modo de vida. Como veremos no último item deste capítulo, autoridades de muitos países têm se reunido em fóruns mundiais dedicados a tratar globalmente dos problemas ambientais e das possíveis soluções.

Em 1987, uma comissão de estudos ambientais enfatizou um conceito que amadureceu ao longo da década de 1970: o **desenvolvimento sustentável**. Segundo a comissão, desenvolvimento sustentável é aquele que leva em conta as necessidades atuais da humanidade sem comprometer a capacidade das futuras gerações de obter o necessário à sua vida. Em outras palavras, cada geração tem o compromisso de deixar para as gerações seguintes um ambiente equivalente ou melhor do que o recebido de seus antecessores. Esse deveria ser o princípio norteador das ações e das atividades humanas em relação ao ambiente.

O princípio do desenvolvimento sustentável pode (e deve) ser aplicado a diversos aspectos do relacionamento da humanidade com o ambiente. Por exemplo, ao explorar os recursos de florestas e de outros ambientes naturais, é preciso garantir o replantio das espécies nativas para permitir sua perpetuação. Outra ação importante para o desenvolvimento sustentável é investir no estudo de fontes de energia renováveis – biocombustíveis, energia eólica, energia solar e energia hidrelétrica –, substituindo gradativamente os combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral. Economizar água em casa, evitando os desperdícios, também é uma atitude coerente com os princípios do desenvolvimento sustentável, uma vez que ajuda a garantir a disponibilidade desse precioso recurso natural a nossos filhos e netos.

A ideia central do desenvolvimento sustentável é simples, mas sua aplicação é complexa e requer a parceria ativa de diversos setores da sociedade: governo, iniciativa privada, instituições de ensino e de pesquisa, mídia (TV, internet, imprensa), educadores e estudantes.

Apresentamos, a seguir, alguns princípios para uma sociedade sustentável segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma). Reflita sobre eles antes de iniciar a leitura do item seguinte.

- **Respeitar e cuidar da comunidade dos seres vivos** [...]. Trata-se de um princípio ético que "reflete o dever de nos preocuparmos com as outras pessoas e outras formas de vida, agora e no futuro".
- **Melhorar a qualidade da vida humana** [...]. Esse é o verdadeiro objetivo do desenvolvimento, ao qual o crescimento econômico deve estar sujeito: permitir aos seres humanos "perceber o seu potencial, obter autoconfiança e uma vida plena de dignidade e satisfação".
- **Conservar a vitalidade e a diversidade do planeta Terra** [...]. O desenvolvimento deve ser tal que garanta a proteção "da estrutura, das funções e da diversidade dos sistemas naturais do planeta, dos quais temos absoluta dependência".
- **Minimizar o esgotamento de recursos não renováveis** [...]. São recursos como os minérios, petróleo, gás [natural], carvão mineral. Não podem ser usados de maneira "sustentável" porque não são renováveis, pelo menos na escala de tempo humana. Mas podem ser retirados de modo a reduzir perdas e principalmente minimizar o impacto ambiental. Devem ser usados de modo a "ter sua vida prolongada como, por exemplo, por meio de reciclagem, pela utilização de menor quantidade na obtenção de produtos ou pela substituição por recursos renováveis, quando possível".
- **Permanecer nos limites de capacidade de suporte do planeta Terra** [...]. Não se pode ter uma definição exata, por enquanto, mas sem dúvida há limites para os impactos que os ecossistemas e a biosfera como um todo podem suportar sem provocar uma destruição arriscada. Isso varia de região para região. Poucas pessoas consumindo muito podem causar tanta destruição quanto muitas pessoas consumindo pouco. Devem-se adotar políticas que desenvolvam técnicas adequadas e tragam equilíbrio entre a capacidade da natureza e as necessidades de uso pelas pessoas.
- **Modificar atitudes e práticas pessoais** [...]. "Para adotar a ética de se viver sustentavelmente, as pessoas devem reexaminar os seus valores e alterar o seu comportamento. A sociedade deve promover atitudes que apoiem a nova ética e desfavoreçam aqueles que não se coadunem com o modo de vida sustentável."
- **Permitir que as comunidades cuidem de seu próprio ambiente** [...]. É nas comunidades que os indivíduos desenvolvem a maioria das atividades produtivas e criativas. E constituem o meio mais acessível para a manifestação de opiniões e tomada de decisões sobre iniciativas e situações que as afetam.
- **Gerar uma estrutura nacional para a integração de desenvolvimento e conservação** [...]. A estrutura deve garantir "uma base de informação e de conhecimento, leis e instituições, políticas econômicas e sociais coerentes". A estrutura deve ser flexível e regionalizável, considerando cada região de modo integrado, centrado nas pessoas e nos fatores sociais, econômicos, técnicos e políticos que influem na sustentabilidade dos processos de geração e distribuição de riqueza e bem-estar.
- **Constituir uma aliança global** [...]. Hoje, mais do que antes, a sustentabilidade do planeta depende da confluência das ações de todos os países, de todos os povos. As grandes desigualdades entre ricos e pobres são prejudiciais a todos. "A ética do cuidado com a Terra aplica-se em todos os níveis, internacional, nacional e individual. Todas as nações só têm a ganhar com a sustentabilidade mundial e todas estão ameaçadas caso não consigamos essa sustentabilidade."

Fonte: *Parâmetros Curriculares Nacionais*: temas transversais para 5ª e 8ª séries. Brasília, 1998. p. 239-241.

ADILSON SECCO

12.2 Poluição e desequilíbrios ambientais

Poluição ambiental

Poluição (do latim *poluere*, manchar, poluir) é a presença concentrada no ambiente de determinadas substâncias ou agentes físicos, genericamente denominados poluentes. Em geral, os poluentes são produzidos direta ou indiretamente por ação humana e podem afetar a vida de uma ou mais espécies de uma comunidade biológica.

As atividades humanas, principalmente nas sociedades industrializadas, geram diversos tipos de materiais poluentes: lixo dos mais diversos tipos, fumaça, resíduos industriais, gases liberados pelo escapamento de veículos motorizados etc., além de grande quantidade de resíduos orgânicos, como excrementos e urina.

A poluição ambiental decorrente do desenvolvimento industrial já provocou grandes tragédias. Em Londres, no inverno de 1952, as condições climáticas não permitiram a dispersão dos poluentes liberados pelos automóveis, pelas fábricas e pelos sistemas de aquecimento das residências, o que produziu efeitos dramáticos: mais de 4 mil pessoas morreram em poucos dias, em virtude de problemas respiratórios causados pelos poluentes que se concentraram na baixa atmosfera. Nos dois meses seguintes, mais de 8 mil pessoas morreram de enfermidades motivadas ou agravadas pela poluição atmosférica.

Outra catástrofe ambiental de grandes proporções ocorreu em Chernobyl, na então União Soviética, em 1986. Uma falha na refrigeração de um reator nuclear fez com que ele explodisse, lançando poluentes radioativos responsáveis pela morte imediata de dezenas de pessoas e doenças em milhares de outras. Outro incidente com energia nuclear aconteceu no Japão em 2011, após um terremoto e um *tsunami* que atingiram a região.

O esclarecimento e a educação da população podem contribuir para o controle da poluição. Somente uma sociedade civil amplamente organizada e informada será capaz de manter atitudes sustentáveis e de exercer uma fiscalização ambiental sistemática, exigindo a criação e principalmente o cumprimento de leis ecológicas eficientes.

Poluição atmosférica

As principais fontes geradoras da **poluição atmosférica** são os motores de veículos, as indústrias (siderúrgicas, fábricas de cimento e de papel, refinarias etc.), a incineração de lixo doméstico e as queimadas de campos e florestas.

As ações humanas, denominadas atividades antrópicas (do grego *antropos*, ser humano), são responsáveis pela liberação na atmosfera de milhões de toneladas anuais de gases tóxicos como o monóxido de carbono, o ozônio, o dióxido de enxofre, o dióxido de nitrogênio e diversos tipos de hidrocarbonetos, além de gás carbônico e do chamado material particulado, constituído por partículas de poeira, fumaça e materiais sólidos e líquidos suspensos no ar. (Fig. 12.1)

Um dos poluentes mais perigosos para os habitantes das grandes metrópoles é o **monóxido de carbono** (**CO**), um gás incolor, inodoro, menos denso que outros gases do ar e extremamente tóxico para os seres humanos. Esse gás é produzido pela queima incompleta de moléculas orgânicas e sua principal fonte de emissão são os motores a combustão de veículos como automóveis, motocicletas, ônibus, caminhões etc.

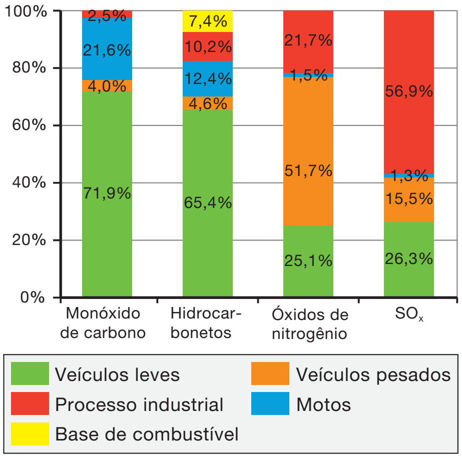
O monóxido de carbono combina-se irreversivelmente com a hemoglobina do sangue, inutilizando-a para o transporte de gás oxigênio. A exposição prolongada de uma pessoa ao monóxido de carbono pode levar à perda de consciência e à morte; a intoxicação por esse gás causa sintomas de asfixia e aumento dos ritmos respiratório e cardíaco.

O **ozônio** (**O_3**), apesar de reter parte das radiações solares e ser importante para a proteção dos seres vivos quando presente na estratosfera, é um gás poluente quando concentrado próximo ao solo, provocando irritação nos olhos e problemas respiratórios, além de danos à vegetação. Nas grandes cidades, poluentes liberados pelos veículos motorizados potencializam a reação de formação de ozônio na baixa atmosfera; nos meses de inverno, o problema é agravado pela ocorrência de inversões térmicas.

Outro poluente atmosférico perigoso é o **dióxido de enxofre** (**SO_2**), gás proveniente da queima industrial de combustíveis como o carvão mineral e o óleo *diesel*, que contêm enxofre como impureza. O dióxido de enxofre e também o **dióxido de nitrogênio** (**NO_2**) podem provocar bronquite, asma e enfisema pulmonar.

Ao reagir com vapor-d'água presente na atmosfera, esses óxidos podem levar à formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido nítrico (HNO_3), que se dissolvem nas nuvens, precipitando-se na forma de **chuvas ácidas**. Em países como os do Leste Europeu, em que a produção de energia é baseada na queima de carvão mineral e óleo *diesel*, as chuvas ácidas têm provocado grandes danos à vegetação, além de corroer construções e monumentos. (Fig. 12.2)

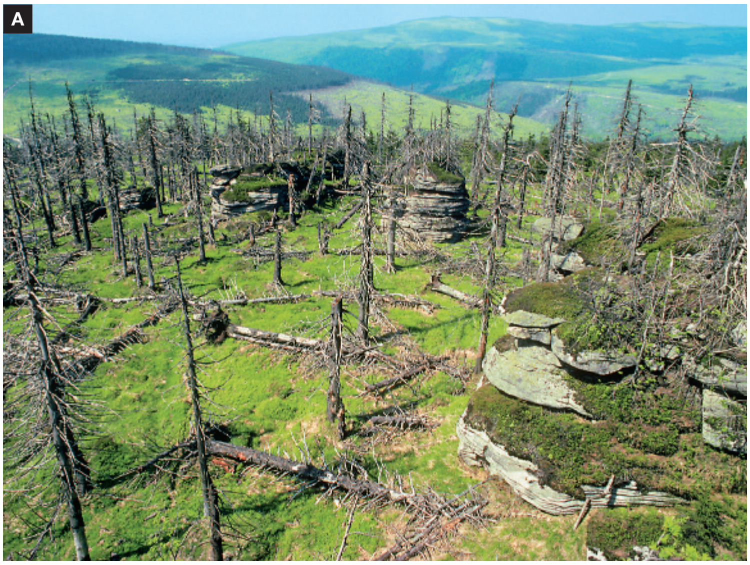
Contribuição de diferentes fontes nos principais componentes da poluição atmosférica em São Paulo



ERICSON GUILHERME LUCIANO

Figura 12.1 Gráfico que mostra as estimativas de emissões relativas dos principais poluentes da atmosfera no estado de São Paulo em 2014. (Elaborado com base em dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – Cetesb.)

RICHARD PACKWOOD/GETTY IMAGES



JUDITH A. POE/SCIENCE SOURCE/DIOMEDIA

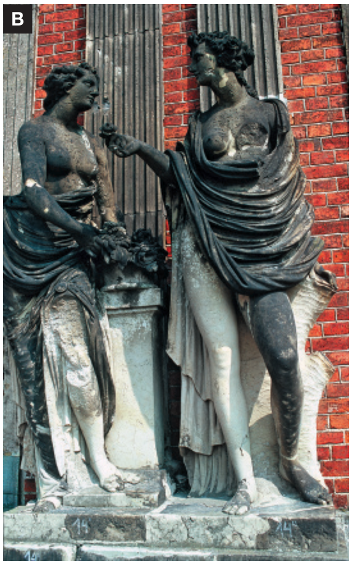


Figura 12.2
A. Floresta degradada por chuva ácida (República Tcheca, 2005). **B.** Escultura danificada pela chuva ácida (Potsdam, Alemanha, 1991).

A matéria particulada poluente suspensa no ar, presente em grande quantidade nas cidades modernas, é produzida principalmente por desgaste de pneus e de freios de automóveis e pela combustão de óleo *diesel*. Outras fontes de partículas poluidoras da atmosfera são as usinas siderúrgicas e as fábricas de cimento, estas últimas também responsáveis pela liberação de sílica (SiO_2). A sílica e o amianto, quando se encontram na forma de partículas em suspensão no ar, podem causar doenças pulmonares, como fibrose e enfisema.

Inversão térmica

Em condições normais, as camadas mais baixas da atmosfera são mais quentes porque absorvem calor irradiado pela superfície terrestre. Por ser menos denso, o ar quente tende a subir, carregando poluentes eventualmente presentes em suspensão. O ar quente que sobe é substituído por ar frio que desce e este, ao se aquecer, volta a subir. O movimento ascendente e descendente de ar, denominado corrente de convecção, é responsável pela dispersão dos poluentes atmosféricos continuamente produzidos em uma cidade.

Nos meses de inverno, devido ao resfriamento do solo, a camada baixa de ar atmosférico pode esfriar mais que a camada imediatamente superior, fenômeno denominado **inversão térmica**. Com isso, os movimentos de convecção são interrompidos e os poluentes deixam de se dispersar para as camadas mais altas da atmosfera, concentrando-se na camada de ar frio aprisionada entre a superfície e a camada de ar quente. Nessas ocasiões, é comum ocorrer aumento dos casos de irritação das mucosas e de problemas respiratórios nos habitantes dos grandes centros urbanos. (Fig. 12.3)

ILUSTRAÇÕES: OSVALDO SEQUETIN

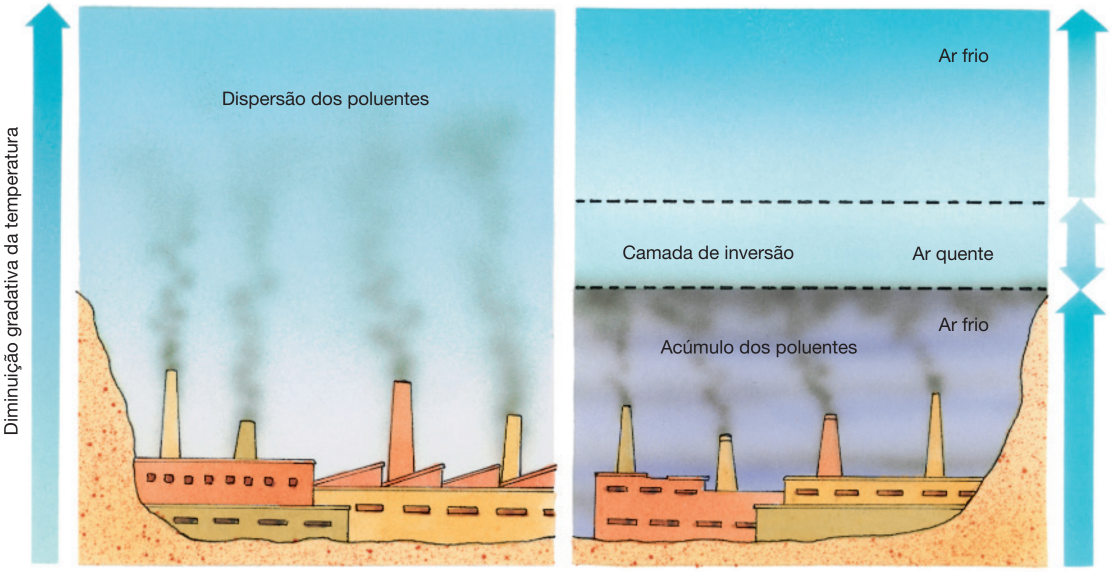


Figura 12.3 Representação esquemática da dispersão de poluentes do ar em situação normal (à esquerda) e em situação de inversão térmica (à direita). (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Aumento do efeito estufa

Parte da radiação solar que chega à Terra é refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre; outra parte é absorvida principalmente pelo solo e reirradiada para a atmosfera na forma de calor (radiação infravermelha). Esse fenômeno natural é denominado **efeito estufa** e contribui para manter aquecida a superfície terrestre, impedindo a perda muito rápida de calor para o espaço. Graças ao efeito estufa, a Terra mantém uma temperatura média que possibilita a existência de vida.

O efeito estufa resulta principalmente da presença na atmosfera de vapor-d’água, gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e dióxido de nitrogênio (NO_2), cujas moléculas têm capacidade de absorver calor. O aumento de alguns desses gases na atmosfera, em consequência das atividades antrópicas, vem provocando a intensificação do efeito estufa. Estima-se que, nos próximos anos, isso levará a um aumento significativo da temperatura média na superfície terrestre. (Fig. 12.4)

A quantidade de gás carbônico na atmosfera vem aumentando progressivamente desde a Revolução Industrial, quando a queima de combustíveis fósseis (carvão mineral e petróleo) começou a ser empregada em larga escala para produzir energia. Hoje, a concentração de gás carbônico no ar está próxima de 0,039% da composição atmosférica (390 partes por milhão ou ppm), um aumento superior a 40% em relação ao período pré-industrial. Recentememte, estações medidoras do Havaí registraram níveis recordes de CO_2, superiores a 0,04%.

Estima-se que a concentração de gás metano (CH_4) na atmosfera também aumentou mais de 150% no mesmo período. O metano resulta principalmente da decomposição da matéria orgânica. O aumento da população humana contribui para a maior produção de lixo e esgotos, o que está diretamente relacionado com a elevação da concentração de gás metano na atmosfera; o aumento das áreas alagadas para o cultivo de arroz, onde ocorre muita decomposição de matéria orgânica, também tem elevado a concentração de metano atmosférico. Outras fontes emissoras de metano são os rebanhos de gado bovino e caprino. Nos tubos digestivos desses animais ruminantes há grande quantidade de microrganismos produtores de gás metano.

O ano de 2015 foi o mais quente da história (o segundo mais quente foi 2010 e o terceiro, 2005), desde que as temperaturas médias anuais no globo terrestre começaram a ser registradas em 1861. Durante o século XX, a temperatura global da superfície terrestre aumentou mais de 0,6 °C e, de acordo com estudos da ONU, o planeta deverá estar cerca de 2 °C mais quente até o ano de 2100.

Alguns cientistas consideram conservadoras essas estimativas da ONU e acreditam que, se os gases responsáveis pelo efeito estufa continuarem a se acumular na atmosfera, devemos esperar uma elevação de até 4 °C na temperatura média mundial nos próximos 50 anos.

O aumento significativo da temperatura global pode trazer grandes mudanças no clima da Terra, algumas presumivelmente de efeitos catastróficos.

Nas regiões tropicais, ocorreriam tempestades torrenciais; nas regiões temperadas, o clima ficaria mais quente e mais seco; nas regiões polares, parte do gelo derreteria (o que parece já estar acontecendo), causando a elevação do nível dos mares e a inundação de cidades litorâneas e de planícies.

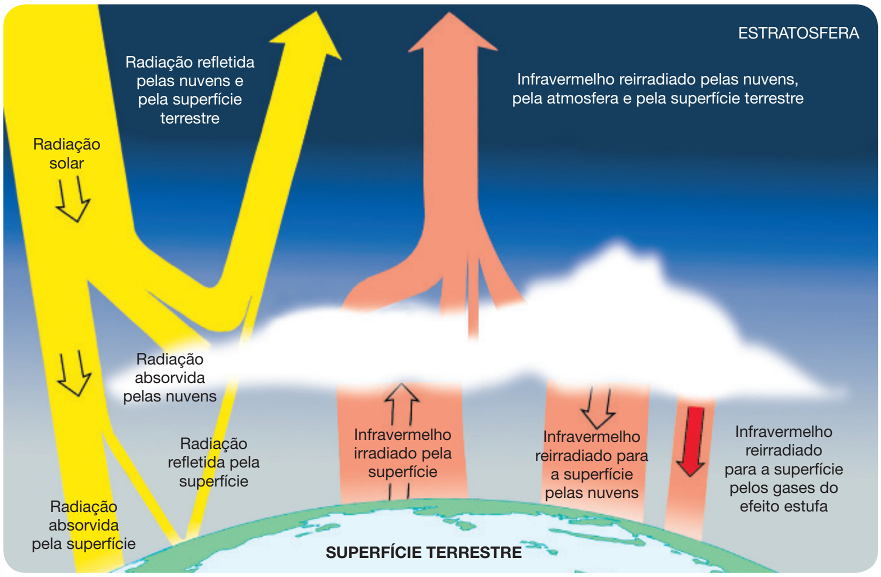

ESTRATOSFERA
Radiação refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre
Infravermelho reirradiado pelas nuvens, pela atmosfera e pela superfície terrestre
Radiação solar
Radiação absorvida pelas nuvens
Radiação refletida pela superfície
Infravermelho irradiado pela superfície
Infravermelho reirradiado para a superfície pelas nuvens
Infravermelho reirradiado para a superfície pelos gases do efeito estufa
Radiação absorvida pela superfície
SUPERFÍCIE TERRESTRE

Figura 12.4 Representação esquemática do efeito estufa atmosférico. Analise a figura acompanhando as explicações no texto. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ADILSON SECCO

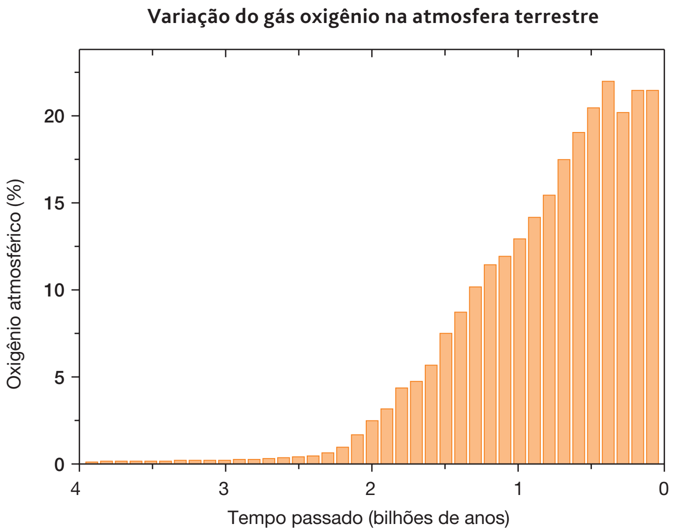
Ciência e cidadania

O escudo atmosférico de gás ozônio

1 Novos conhecimentos revelaram que a atmosfera terrestre não é um simples invólucro gasoso, mas parte integrante da biosfera, contribuindo para a manutenção da vida e sendo por ela influenciada. Graças à sua capacidade de reter calor – o efeito estufa –, a atmosfera permite manter as temperaturas terrestres favoráveis à existência de seres vivos. Além disso, ela filtra a maior parte das radiações solares nocivas aos organismos, principalmente as radiações ultravioleta (UV) de alta energia. Os sistemas de ventos e correntes atmosféricas também são responsáveis pela distribuição de calor e umidade e, em última análise, pelo clima do planeta.

2 Os cientistas acreditam que, entre 4 e 3,5 bilhões de anos atrás, a atmosfera terrestre era constituída por 80% de gás carbônico (CO_2), 10% de metano (CH_4), 5% de monóxido de carbono (CO) e 5% de gás nitrogênio (N_2). Hoje, ela é composta por 78% de N_2, 21% de gás oxigênio (O_2), 0,9% de argônio (Ar) e 0,04% de gás carbônico (CO_2), além de pequenas quantidades de outros gases.

3 O que teria levado a essa alteração na composição atmosférica do passado até hoje? Tudo indica que foram o aparecimento e a proliferação dos seres fotossintetizantes, entre 2,5 e 2 bilhões de anos atrás. O processo de fotossíntese, como sabemos, libera O_2 para o ambiente. A capacidade de utilizar substâncias simples (CO_2 e H_2O) e energia da luz solar permitiu que bactérias fotossintetizantes primitivas invadissem os mares e todos os ambientes úmidos do planeta. A quantidade de O_2 liberado por elas foi tal que alterou significativamente a composição da atmosfera terrestre: a concentração de O_2, de quase zero, aumentou progressivamente até atingir a porcentagem atual, em torno de 21%.



ADILSON SECCO

Gráfico da variação da porcentagem de gás oxigênio (O_2) na atmosfera da Terra desde sua formação. (Elaborado com base em Vieyra, A. e Souza-Barros, F., 2000.)

4 Há cerca de 2 bilhões de anos surgiram seres vivos que utilizam o O_2 na respiração aeróbica, liberando CO_2 e H_2O como produtos. Desse modo, começou a se estabelecer na Terra um equilíbrio dinâmico entre fotossíntese e respiração aeróbica, e esse equilíbrio perdura até hoje. Na fotossíntese, CO_2 e H_2O são utilizados como reagentes e originam moléculas orgânicas e O_2 como produtos; na respiração aeróbica, moléculas orgânicas reagem com moléculas de O_2 e originam H_2O e CO_2 como produtos.

5 Uma consequência da presença maciça de O_2 na atmosfera terrestre foi a formação de uma camada de gás ozônio (O_3) entre 12 e 50 quilômetros de altitude. O ozônio origina-se do próprio gás oxigênio (O_2) e bloqueia a passagem da maior parte da radiação ultravioleta (UV) proveniente do Sol, que teria efeito letal sobre os seres vivos. Antes do surgimento da camada de ozônio, a vida estava restrita aos ambientes de lagos e mares, onde a penetração do UV é bem menor. Acredita-se que a filtração de radiação ultravioleta pela camada de ozônio tenha permitido aos seres vivos a possibilidade de colonizar ambientes de terra firme, expostos à luz solar.

6 Quando uma forma de radiação ultravioleta (UV) proveniente do Sol (a radiação ultravioleta curta) atinge a atmosfera rica em O_2, causa ruptura de certa quantidade de moléculas desse gás, com liberação de átomos de oxigênio isolados altamente reativos (O). Parte deles volta a formar O_2 e parte reage com moléculas de O_2, formando gás ozônio (O_3). Além de O_2 e de oxigênio atômico (O), a reação necessita de um terceiro participante, genericamente denominado "terceiro corpo" (T), que permite liberar a energia da reação na forma de calor. Esse papel é desempenhado principalmente pelas moléculas de N_2, devido à sua abundância na atmosfera. Parte do O_3 formado logo se decompõe em decorrência da radiação UV, gerando componentes reativos que podem originar tanto O_2 como O_3. Assim, a camada de ozônio mantém-se em equilíbrio dinâmico. Observe, na figura ao lado, a constituição básica da atmosfera terrestre, com destaque para a camada de ozônio.

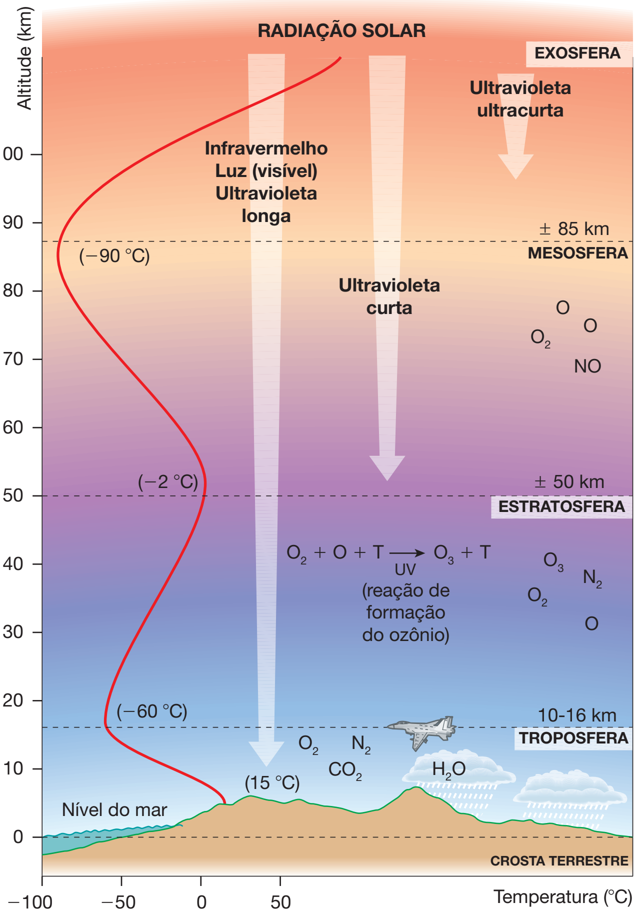

RADIAÇÃO SOLAR
Altitude (km)
EXOSFERA
Ultravioleta ultracurta
Infravermelho
Luz (visível)
Ultravioleta longa
100
90
± 85 km
(−90 °C)
MESOSFERA
80
Ultravioleta curta
O
O
O_2
NO
70
60
(−2 °C)
± 50 km
50
ESTRATOSFERA
40
$O_2 + O + T \xrightarrow[UV]{} O_3 + T$
(reação de formação do ozônio)
O_3
N_2
O_2
O
30
20
(−60 °C)
10-16 km
TROPOSFERA
O_2
N_2
CO_2
H_2O
10
(15 °C)
Nível do mar
0
CROSTA TERRESTRE
−100
−50
0
50
Temperatura (°C)

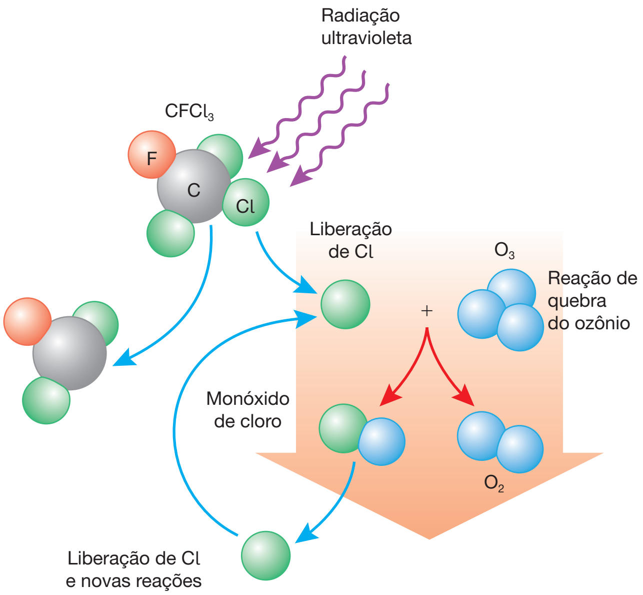
Gráfico da constituição básica da atmosfera terrestre. Note, na curva representada em vermelho na parte esquerda do gráfico, que a temperatura atmosférica varia de acordo com a altitude, o que levou à classificação em faixas: troposfera, estratosfera, mesosfera e exosfera. A formação de ozônio, que libera calor, é responsável pelo aumento de temperatura na estratosfera. (Elaborado com base em Mozeto, A. A., 2001.) (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

ADILSON SECCO

7 Dados obtidos por satélites orbitais mostraram, ao longo da década de 1980, uma diminuição significativa (mais de 50%) na camada de ozônio sobre o continente antártico, no Polo Sul. Nessa região, em certas épocas do ano, a camada de ozônio torna-se anormalmente fina e rarefeita, possibilitando maior passagem de radiação ultravioleta, com os consequentes riscos para os seres vivos do local. No ano 2000, a destruição na camada de ozônio chegou a formar sobre a Antártida um "buraco" com área de 25 milhões de km², aproximadamente.

8 Entre outros agentes, descobriu-se que a principal causa da destruição da camada de ozônio é a liberação, na atmosfera, de gases do grupo dos clorofluorcarbonetos, abreviadamente chamados de CFCs. Eles são gases sintéticos (isto é, produzidos em laboratórios e indústrias) utilizados em aerossóis e em compressores de geladeiras e também liberados durante a fabricação de certos tipos de plástico de embalagens. Os CFCs acumulam-se nas altas camadas da atmosfera, onde o cloro de suas moléculas reage com moléculas de ozônio, quebrando-as.

9 Os alertas de cientistas e ambientalistas levaram os governos a proibir a liberação industrial de uma lista de substâncias, entre elas os CFCs, que causam a destruição do ozônio estratosférico. Relatórios da Agência Espacial Americana, a Nasa, de 2006, sugerem que o problema está sendo controlado. Para os mais pessimistas, mesmo com a recuperação, os danos causados são irreversíveis.



ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Representação esquemática da degradação do ozônio. A radiação ultravioleta, responsável pela produção de ozônio, também pode destruir esse gás se houver CFCs na atmosfera. Sob a ação da radiação ultravioleta, as moléculas de CFC quebram-se e liberam átomos de cloro que se combinam com o ozônio, formando gás oxigênio e monóxido de cloro. Como este último composto é instável, ele libera átomos de cloro e a reação de destruição do ozônio se amplia. Calcula-se que uma única molécula de CFC pode destruir 100 mil moléculas de ozônio. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Guia de leitura

Responda em seu caderno

1 Leia o primeiro parágrafo do texto, que comenta a importância da atmosfera para a biosfera terrestre. Os defensores da chamada Hipótese Gaia sugerem que a Terra deve ser considerada um grande ser vivo de dimensões planetárias. Nesse contexto alegórico, a atmosfera seria a “pele” de Gaia (a Terra); no nosso caso, a pele também retém calor e filtra radiação UV, entre tantas outras funções. Em sua opinião, comparações desse tipo podem ajudar a compreender os conceitos em Ecologia? Escreva um texto sobre isso.

2 Leia os parágrafos 2 e 3, acompanhando-os com a análise do gráfico (e respectiva legenda) da variação da porcentagem de gás oxigênio (O_2) na atmosfera da Terra desde sua formação. Certifique-se de que compreendeu a explicação para o aumento explosivo do teor de gás oxigênio na atmosfera, de 2,5 bilhões de anos atrás até hoje. Resuma essa ideia em uma frase explicativa sintética.

3 O parágrafo 4 refere-se ao equilíbrio atual entre fotossíntese e respiração aeróbica em relação aos gases O_2 e CO_2. Escreva um texto que exponha essa ideia com palavras e frases simples, como se estivesse explicando a uma criança. Atente para que os conceitos sejam apresentados de forma simples, mas correta.

4 Leia o parágrafo 5. Ele relaciona os seguintes conceitos: radiação ultravioleta (UV), gás oxigênio (O_2) e gás ozônio (O_3). Elabore um pequeno mapa conceitual unindo esses três conceitos por meio de proposições e outras poucas palavras. O desafio seguinte é acrescentar no diagrama o conceito **fotossíntese**. Como você faria essa relação?

5 O sexto parágrafo deve ser lido mais de uma vez, com diversas consultas e comparações com o gráfico que representa a constituição básica da atmosfera terrestre. Leia a legenda utilizando-a para compreender e complementar informações. Observe que esse gráfico representa a altitude a partir do nível do mar, no eixo das ordenadas, e a temperatura, no eixo das abscissas. Note como a temperatura varia nas diferentes faixas atmosféricas. Na estratosfera, a temperatura sobe devido à formação de ozônio. Localize o trecho que permite deduzir essa informação. Certifique-se de que compreendeu como o ozônio se forma e o que significa dizer que a camada de ozônio é dinâmica. Explique esta última ideia em uma frase curta.

6 Leia os parágrafos 7, 8 e 9, que se referem às ameaças à camada de ozônio. Quais são os principais causadores da sua destruição? Acompanhe, na representação esquemática da degradação do ozônio, como agem esses “inimigos” do ozônio atmosférico. Para os seres vivos, qual seria a consequência da destruição da camada de ozônio? Retome as reflexões sobre esse assunto ao ler o último item do capítulo, que cita algumas das providências mundiais para conter a destruição do ozônio. E, sempre que possível, acompanhe na imprensa a situação da camada de ozônio.

Poluição das águas e do solo

A forma mais comum e talvez a mais antiga de poluir as águas é por meio do lançamento de dejetos de humanos e de animais domésticos em rios, lagos e mares. Por serem constituídos de material orgânico, esses dejetos aumentam a quantidade de nitratos e fosfatos, bem como de outros nutrientes presentes no ambiente aquático, fenômeno denominado **eutrofização** ou eutroficação (do grego *eu*, bem, bom, e *trofos*, nutrição).

A eutrofização geralmente leva à multiplicação intensa de bactérias aeróbicas, que utilizam gás oxigênio em sua respiração. A proliferação dessas bactérias acaba por consumir rapidamente o gás oxigênio dissolvido na água, causando a morte por asfixia da maioria das formas de vida aquática, inclusive delas próprias.

A eutrofização de ambientes marinhos pode levar à grande proliferação de certos dinoflagelados (protoctistas fotossintetizantes), provocando o fenômeno conhecido por **maré vermelha**, em virtude da coloração que esses organismos conferem à água. As marés vermelhas produzem grande mortandade de peixes, principalmente porque, além de liberar substâncias tóxicas na água, os dinoflagelados competem com eles pelo gás oxigênio.

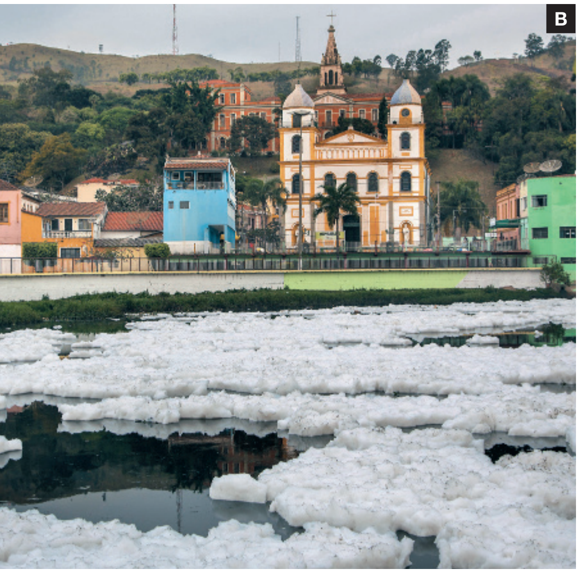
Por causa da eutrofização por esgotos humanos, muitos rios que banham grandes cidades pelo mundo tiveram sua flora e sua fauna destruídas, tornando-se esgotos a céu aberto. O lançamento de esgotos nos rios sem tratamento prévio acarreta, ainda, a propagação de doenças como a hepatite A, a amebíase e a cólera, entre outras.

A melhor solução para o problema é o tratamento e o reaproveitamento de esgotos. Atualmente já existem tecnologias para purificar a água proveniente de esgotos e utilizar os resíduos semissólidos na produção de fertilizantes. O gás metano gerado no processo é usado como combustível.

As águas utilizadas para diversos fins nas casas e depois descartadas – conhecidas como águas servidas – e os resíduos industriais também podem trazer graves problemas ambientais. Substâncias poluentes, como detergentes, ácido sulfúrico e amônia, envenenam os rios e causam a morte de muitas espécies da comunidade aquática.

O desenvolvimento da agricultura também tem contribuído para a poluição do solo e das águas. Fertilizantes sintéticos e agrotóxicos (inseticidas, fungicidas e herbicidas), utilizados em quantidades abusivas nas lavouras, poluem o solo e as águas dos rios, eventualmente intoxicando o próprio agricultor e sua família e matando diversos seres vivos dos ecossistemas. (Fig. 12.5)

LUCIANA WHITAKER/PULSAR IMAGENS



RUBENS CHAVES/PULSAR IMAGENS

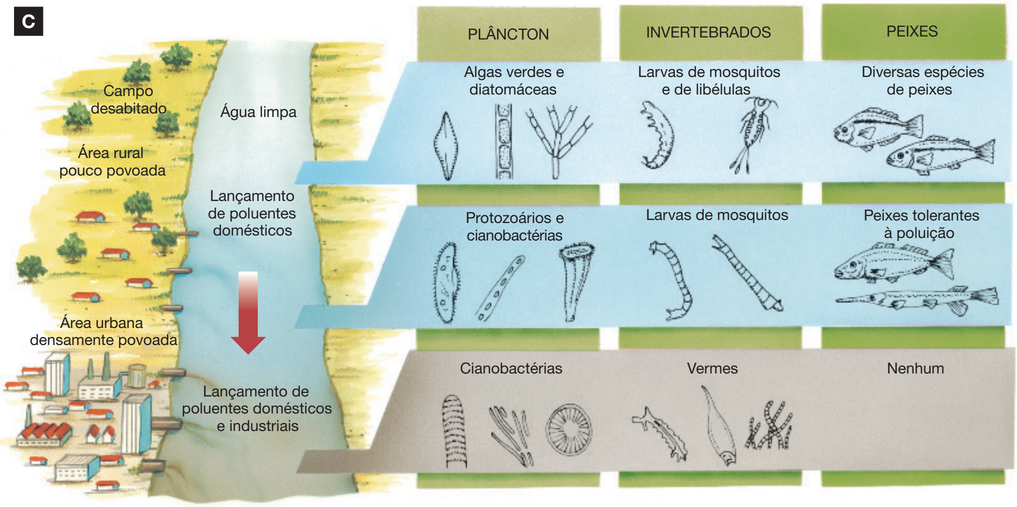

C
PLÂNCTON
INVERTEBRADOS
PEIXES
Campo desabitado
Água limpa
Área rural pouco povoada
Algas verdes e diatomáceas
Larvas de mosquitos e de libélulas
Diversas espécies de peixes
Lançamento de poluentes domésticos
Protozoários e cianobactérias
Larvas de mosquitos
Peixes tolerantes à poluição
Área urbana densamente povoada
Lançamento de poluentes domésticos e industriais
Cianobactérias
Vermes
Nenhum

ILUSTRAÇÃO: JURANDIR RIBEIRO

Figura 12.5 A. Esgoto doméstico sendo lançado em córrego (Rio de Janeiro, RJ, 2013). **B.** Grande quantidade de espuma sobre as águas do rio Tietê, evidenciando a poluição (Pirapora de Bom Jesus, SP, 2013). **C.** Representação esquemática da poluição de um rio ao longo de seu curso; o lançamento de esgotos e de resíduos industriais nos rios é uma das principais formas de poluição. O aumento da concentração de poluentes causa a alteração da comunidade biológica que habita o rio, o que pode levar à sua eliminação. (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)

Amplie seus conhecimentos

Descarte de dejetos humanos

"Todos os produtos provenientes do corpo humano, mas mais notavelmente fezes e urina, podem ser considerados poluentes.

Os gregos foram provavelmente os primeiros a controlar o acúmulo de poluentes nas cidades, e uma lei de 320 a.C. proibia a deposição de resíduos nas ruas. Os romanos também eram bastante conscientes quanto à poluição e depositavam os resíduos das cidades em covas fora dos muros das cidades. Quando as civilizações gregas e romanas entraram em decadência, seus controles bastante sofisticados da poluição urbana colapsaram.

Os castelos medievais, por exemplo, eram geralmente projetados com latrinas que se projetavam dos muros dos castelos, as quais simplesmente depositavam resíduos na base dos muros (os resíduos acumulados fornecem aos arqueólogos um registro direto das dietas históricas e da infestação por vermes intestinais).

Até os séculos XIV e XV, as ruas abertas novamente tornaram-se o principal e único destino de fezes e urina humana e de animais. Um comércio especial, o do lixeiro, era pago para transportar os resíduos para lixões fora das cidades; em 1714 cada cidade na Inglaterra tinha um lixeiro oficial [...].

Mesmo quando os vasos sanitários [...] começaram a ser instalados em alguns países no início do século XIX, os reservatórios subterrâneos (fossas) dentro dos quais aqueles eram esvaziados frequentemente transbordavam e contaminavam a água potável. Epidemias de cólera na metade do século XIX foram diretamente associadas a essa fonte de contaminação, uma descoberta que levou à ligação dos resíduos domiciliares diretamente aos esgotos cloacais tanto na Grã-Bretanha quanto nos EUA.

A um primeiro olhar, a forma mais fácil de lidar com fezes e urina acumuladas poderia parecer ser diluí-las em grandes corpos de água. Contudo, não é fácil descartar resíduos humanos e ao mesmo tempo fornecer água potável. [...]

Todos os ecossistemas naturais têm uma capacidade inerente de decompor fezes e, até certo ponto, processos naturais de decomposição em rios, lagos e oceanos podem tolerar o aumento dos níveis de matéria orgânica oriundos de esgotos humanos sem mudanças óbvias na natureza das comunidades biológicas que eles contêm.

Contudo, problemas surgem quando a taxa de aporte dos esgotos ultrapassa essa capacidade. Primeiro, taxas excessivamente altas de decomposição de matéria orgânica morta em rios e lagos podem levar a condições anaeróbias (causando a morte de peixes e invertebrados). Isso acontece porque o oxigênio é consumido pelos microrganismos decompositores mais rapidamente do que é reposto pela fotossíntese das plantas aquáticas e a difusão do ar. Segundo, o suprimento de nutrientes como fosfato e nitrato, que normalmente limitam o crescimento vegetal em corpos de água, pode ser incrementado a um nível no qual o crescimento das algas é tão grande que estas sombreiam e matam outras plantas aquáticas [...].

Os sistemas modernos de esgotos foram desenvolvidos como equipamentos ecológicos para o manejo da poluição. Eles têm como objetivo capturar poluentes da água contendo resíduos e limpá-la, habitualmente em um sistema de drenagem separado daquele que transporta fluxos pesados de água da chuva. Idealmente, um sistema de esgotos limpa a água poluída até um estado de potabilidade, antes de liberá-la de volta aos rios, lagos e oceanos. [...]"

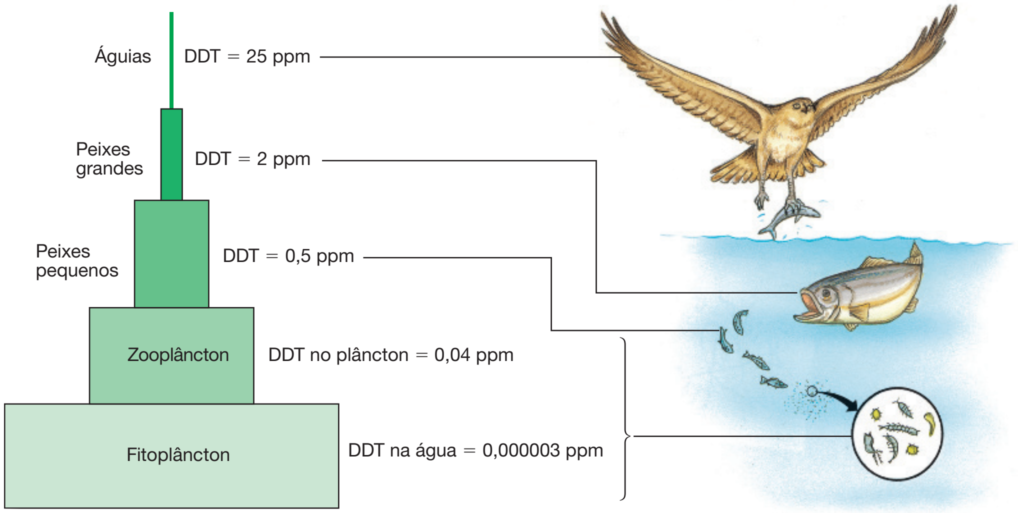
Fonte: TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. *Fundamentos em Ecologia*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008.

Concentração de poluentes ao longo das cadeias alimentares

Desde a década de 1940, o diclorodifeniltricloroetano (DDT) e outros inseticidas do grupo dos organoclorados vêm sendo utilizados nas lavouras por sua alta eficiência contra diversos insetos. Entretanto, se absorvido pela pele ou se contaminar alimentos, o DDT pode causar doenças no fígado, como a cirrose e o câncer, tanto em seres humanos quanto em outros animais. Por ser muito nocivo, o emprego desse produto está proibido em diversos países, inclusive no Brasil.

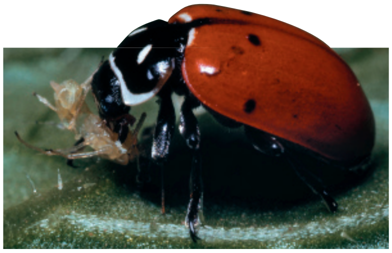
O DDT, além de outros inseticidas e poluentes, possui a capacidade de se concentrar no corpo dos organismos que o absorvem. Animais como os moluscos bivalves, por exemplo, que obtêm alimento filtrando a água circundante, podem acumular grandes quantidades do inseticida no corpo, em concentração até 70 mil vezes maior que a da água contaminada onde vivem. Se consumidos como alimento por pessoas ou por animais, os moluscos contaminados podem provocar graves intoxicações.

Poluentes como o DDT são absorvidos pelos produtores e passados sucessivamente para os consumidores primários, consumidores secundários e assim por diante. Como cada organismo de um nível trófico superior alimenta-se, proporcionalmente, de grande quantidade de material do nível inferior, esses poluentes, por não serem degradados no metabolismo, tendem a se concentrar nos níveis tróficos superiores. (Fig. 12.6)



ILUSTRAÇÕES: JURANDIR RIBEIRO

Figura 12.6 Representação esquemática das etapas de aumento de concentração do inseticida DDT, em partes por milhão (ppm), nos diversos níveis de uma cadeia alimentar. (Elaborada com base em Campbell, N. A. e cols., 1999.) (Elementos fora de proporção de tamanho entre si; cores-fantasia.)



HARRY ROGERS/SCIENCE SOURCE/LATINSTOCK

Figura 12.7 Joaninha da espécie *Hippodamia convergens* comendo pulgão. Relações ecológicas como essa têm sido utilizadas para enfrentar as pragas por meio do controle biológico. A joaninha mede cerca de 8,5 mm de comprimento.

Para minimizar a poluição provocada por resíduos industriais e agrícolas, é preciso recorrer simultaneamente a várias ações, entre elas: maior controle governamental sobre as indústrias de fertilizantes e agrotóxicos; realização de campanhas educativas junto aos agricultores sobre o emprego correto e não abusivo de defensivos agrícolas e fertilizantes; proibição de produtos comprovadamente tóxicos e perigosos, como o DDT; redução drástica do uso de agrotóxicos na agricultura.

A biotecnologia pode contribuir para a redução do emprego de agrotóxicos ao desenvolver variedades de plantas resistentes a pragas. Outra solução alternativa aos inseticidas é o controle biológico, em que certas espécies podem ser utilizadas para combater pragas. Pulgões de plantas, por exemplo, responsáveis por grandes prejuízos em determinadas lavouras, podem ser combatidos pela introdução controlada de joaninhas, que se alimentam deles e de outros insetos, sem provocar desequilíbrios na teia alimentar. (Fig. 12.7)

Um assunto que permite a participação ativa dos estudantes é o problema do lixo e sua reciclagem. Em muitas das grandes cidades, a coleta do lixo já é feita seletivamente, para facilitar a reciclagem de produtos como metais, plásticos, papéis etc. Estimule os estudantes a participar das discussões sobre a importância da separação do lixo nas residências e de sua reciclagem. Caso a coleta seletiva não seja realizada na escola ou na residência dos estudantes, proponha a elaboração de projetos que possam ser implementados no ambiente escolar.

O problema do lixo urbano

Nos países desenvolvidos, uma pessoa produz, em média, cerca de 2,5 kg de lixo por dia. Com o crescimento demográfico das cidades, em breve não haverá mais áreas para depositar tanto lixo. Enterrá-lo não é a solução, pois pode haver contaminação de reservatórios de água subterrânea utilizados pela própria população produtora de lixo. Queimá-lo contribui para agravar ainda mais a poluição atmosférica, além de representar um desperdício de recursos, tendo em vista que grande parte do material descartado poderia ser reaproveitada.

Soluções para o problema dos resíduos sólidos envolvem a redução do desperdício de materiais e a **reciclagem do lixo**, isto é, o reaproveitamento dos componentes dos resíduos. Para isso, é fundamental separar seus diversos componentes, processo conhecido como triagem do lixo. Latas, por exemplo, podem ter seu metal reaproveitado; o Brasil é um dos maiores recicladores de latas de alumínio do mundo. Plásticos e papel também podem ser reciclados. Calcula-se que, se os EUA reciclassem 50% do papel que utilizam, em vez dos 20% que reciclam atualmente, poderiam deixar de cortar cerca de 100 milhões de árvores por ano. (Fig. 12.8)

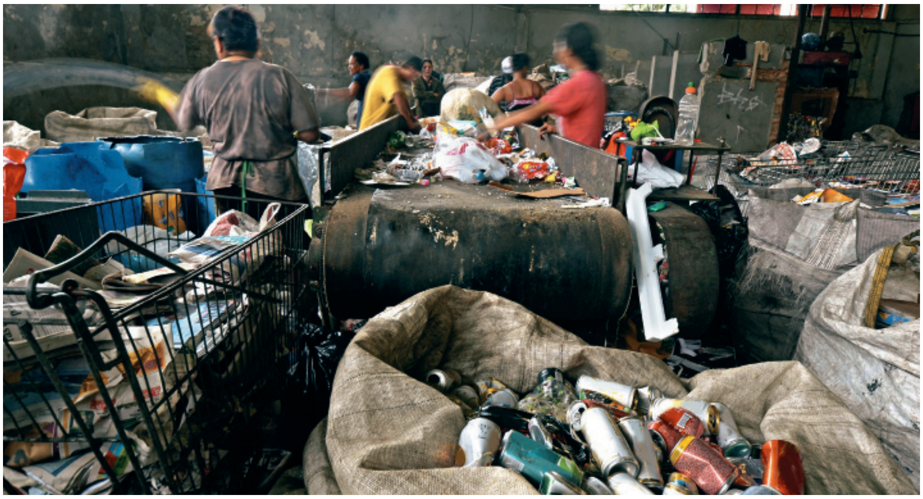

DANIEL CYMBALISTA/PULSAR IMAGENS

Figura 12.8 A reciclagem dos materiais descartados como lixo, além de ajudar a minimizar o problema da poluição ambiental, pode ser fonte de renda para muitas famílias. Na foto, trabalhadores fazendo a triagem de materiais recicláveis (São Paulo, SP, 2011).

Após a separação, a parte orgânica do lixo pode ser degradada por microrganismos em tanques chamados biodigestores. Na **biodigestão**, forma-se metano (CH_4), que pode ser aproveitado como combustível residencial, industrial ou em veículos motorizados. Os resíduos sólidos da biodigestão podem ser usados como fertilizantes do solo.

Atualmente, a reciclagem ainda é um processo caro, sendo mais fácil e barato utilizar matéria-prima natural do que matéria reciclada. Nesse cálculo, no entanto, não se leva em conta a degradação ambiental, que poderá representar um custo altíssimo para as gerações futuras. Com o progressivo esgotamento dos recursos naturais e o avanço das tecnologias de reciclagem, o reaproveitamento do lixo logo deverá ser superior a 50%.

É cada vez mais urgente educar a população acerca do problema do lixo. Mais cedo ou mais tarde o poder público e a população terão de conjugar esforços para resolvê-lo, não só por meios tecnológicos de reciclagem, mas também pela intensificação de ações educativas e de campanhas de conscientização, estimulando as pessoas a desperdiçar menos materiais e a produzir menos lixo.

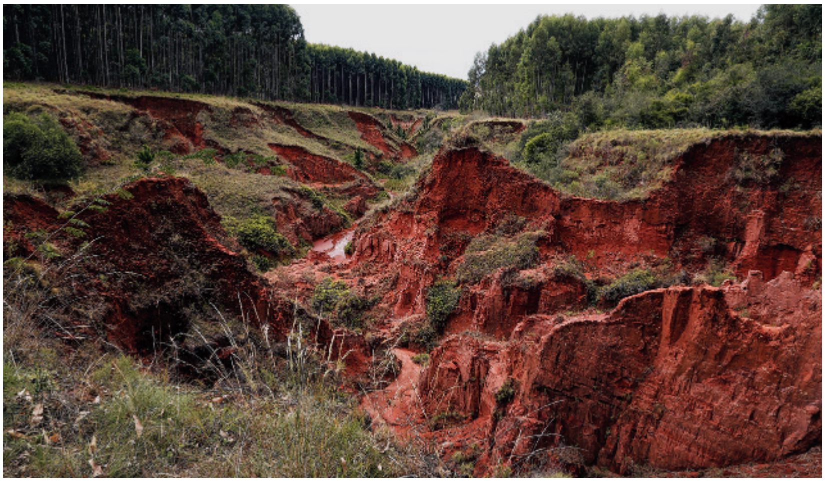
Desmatamento, espécies exóticas e extinção de espécies

Além de interferir nos ambientes naturais e produzir resíduos e poluentes, a humanidade altera o equilíbrio dos ecossistemas pela introdução de espécies exóticas e também pela extinção de espécies nativas. A interferência em comunidades naturais equilibradas pode colocar em risco toda a intricada trama de relações que levou milhares ou milhões de anos para se estabelecer.

A expansão das terras cultivadas e o crescimento das cidades têm causado a destruição dos ambientes naturais. As florestas são derrubadas ou, pior ainda, queimadas, o que prejudica o solo e polui a atmosfera. Essa remoção indiscriminada da vegetação nativa, popularmente chamada **desmatamento**, além de levar comunidades biológicas e espécies à extinção, acarreta a erosão e o empobrecimento do solo.

A erosão é causada principalmente pelas chuvas e pelo vento. Sem a proteção da cobertura vegetal, o solo perde rapidamente suas camadas férteis e tem muitos de seus componentes levados pelas chuvas, tornando-se pobre e acidentado. (Fig. 12.9)

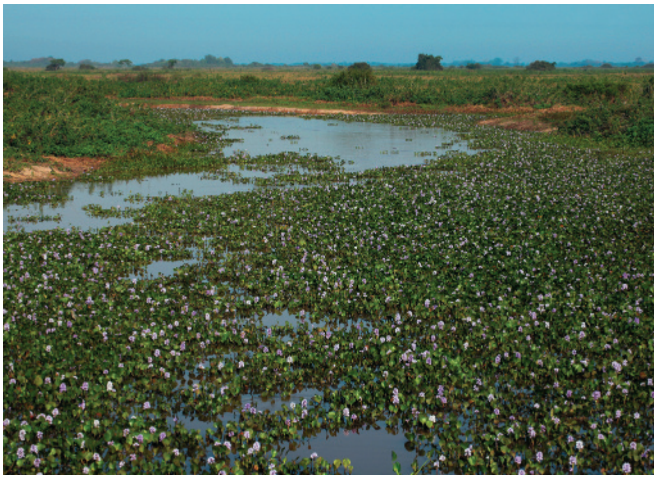
A **introdução de espécies exóticas** tem causado desequilíbrios ambientais em diversas regiões, afetando os ecossistemas nativos. Em seus deslocamentos pelas diversas regiões da Terra, os viajantes humanos transportam, deliberadamente ou não, espécies biológicas de um local para outro. Dessa forma, espécies nativas de uma região podem ser introduzidas em locais onde não existiam anteriormente. (Fig. 12.10)



GERSON GERLOFF/PULSAR IMAGENS

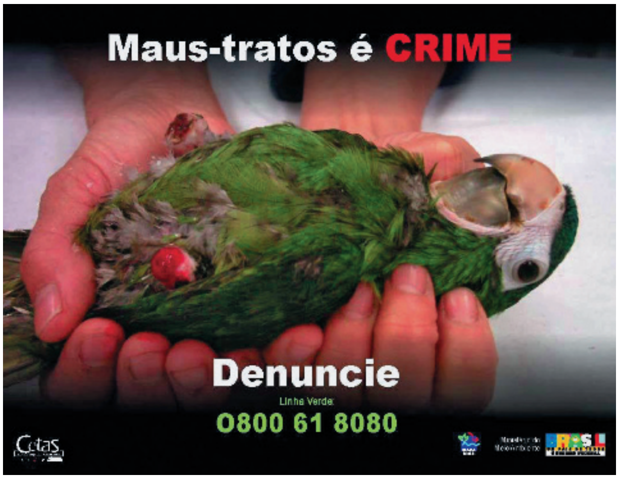
Figura 12.9 Os desmatamentos indiscriminados têm como consequências a erosão e o empobrecimento do solo. Na foto, solo erodido (Cacequi, RS, 2015).

A **extinção de espécies** pode causar sérios distúrbios ao equilíbrio de um ecossistema. Grande número de espécies está ameaçada de extinção em virtude da destruição dos hábitats de plantas e de animais, principalmente devido à expansão das fronteiras agrícolas, além da caça e da pesca excessivas – ou "predatórias". Além disso, o comércio ilegal de animais silvestres reduz a população de determinadas espécies e causa a morte de muitos animais para que apenas alguns consigam chegar às mãos dos compradores. A expansão da população humana e suas ações inconsequentes têm colocado em perigo inúmeras espécies de seres vivos. (Fig. 12.11)



FABIO COLOMBINI

Figura 12.10 O aguapé (gênero *Eichhornia*), também conhecido por jacinto-d'água, produz belas flores de cor lilás e é utilizado como planta ornamental. Em certos casos, porém, prolifera descontroladamente e pode tornar-se uma praga (Pantanal, MT, 2013).



ACERVO DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Figura 12.11 Propaganda do governo brasileiro contra o comércio ilegal de animais silvestres. Não comprar e não ter em casa animais protegidos por lei, como a arara do cartaz, são atitudes de cidadania consciente, em prol da preservação de nossas espécies nativas.

12.3 Alternativas para o futuro

Quem começa a se interessar por Ecologia e conservação da natureza corre o risco de ficar desanimado diante da extensa lista de ameaças ambientais, como vimos no item anterior deste capítulo. Por isso, é importante ter em mente perspectivas e ações positivas, que nos permitam construir um futuro melhor para o ambiente em que vivemos.

O desenvolvimento e a aplicação da ideia de sustentabilidade ambiental são importantes para uma visão moderna, comprometida e atuante da Ecologia. Como vimos, a noção de desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade baseia-se no fato de que nossa sobrevivência e bem-estar dependem, direta ou indiretamente, do ambiente natural. Este, portanto, tem de ser preservado; cada geração tem obrigação de garantir para as gerações seguintes um ambiente que atenda a todas as necessidades humanas básicas. A aceitação e a implementação desse princípio por um número cada vez maior de países é o que poderá garantir que interesses econômicos imediatistas não se sobreponham às expectativas sociais de um mundo melhor para as gerações vindouras.

A seguir, apresentamos um breve histórico da evolução das ideias de preservação dos ambientes e dos recursos naturais.

Décadas de 1960 e 1970

Na década de 1960, começaram a surgir ações governamentais em diversos países visando proteger e conservar os ambientes e os recursos naturais.

A primeira lei ambiental para o controle da poluição foi promulgada em 1967 no Japão. Em decorrência do grande desenvolvimento econômico japonês no período pós-guerra, nas décadas de 1950 e 1960, a poluição atingiu níveis recordes, obrigando o governo a punir as empresas poluidoras.

Em 1970, foram promulgadas leis específicas de controle da poluição das águas e do lançamento de resíduos no ambiente. Nesse mesmo ano, os EUA criaram sua Agência de Proteção Ambiental (EPA, Environmental Protection Agency).

Em 1972, ocorreu a Conferência das Nações Unidas para o Ambiente Humano, em Estocolmo (Suécia). Ela contou com a participação de 113 países, com reuniões preparatórias entre diversos especialistas desde o ano anterior. O ponto alto do encontro foi o reconhecimento da natureza global dos problemas ambientais e da necessidade de todos os países buscarem uma solução conjunta para eles.

Em 1973 e em 1979, ocorreram delicados momentos de crise internacional, envolvendo os principais países exportadores de petróleo (Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Venezuela) e as grandes empresas petrolíferas controladas pelos grandes consumidores, os EUA e a Europa. A crise do petróleo expôs ao mundo uma realidade já conhecida, mas ainda pouco enfatizada na época: as reservas de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão mineral, um dia chegarão ao fim. Quando isso ocorrerá? A resposta é: depende de quanto economizarmos. Entre os resultados positivos da crise do petróleo estão a racionalização do consumo de combustíveis e a busca por fontes alternativas de energia.

Década de 1980

Na década de 1980, houve avanços significativos na proteção ambiental. As observações e as análises científicas mostraram que a camada de ozônio atmosférica, que filtra a radiação ultravioleta proveniente do Sol, estava sendo destruída pela liberação industrial de certos gases, principalmente os CFCs.

Em resposta a esse novo desafio, em 1985 realizou-se em Viena (Áustria) um fórum em que foi criada a Convenção de Proteção à Camada de Ozônio; em 1987, em Montreal (Canadá), uma comissão publicou a lista das substâncias responsáveis pela diminuição (ou depleção, como dizem os cientistas) da camada de ozônio. Essas substâncias passaram a ser proibidas por diversos governos e, hoje, segundo dados da Nasa, a depleção da camada de ozônio está sob controle.

Outro avanço significativo ocorrido em 1987 foi a publicação de um relatório pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Comissão Brundtland), em que se apresentou o conceito de **desenvolvimento sustentável**, depois chamado de **sustentabilidade** (mais informações no item final deste capítulo). A principal conclusão da comissão foi que os antigos conceitos de desenvolvimento e progresso deviam ser repensados, agora sob o ponto de vista da conservação dos ambientes naturais.

A visão da Comissão Brundtland era muito otimista, pois vislumbrava um crescimento econômico com base em políticas que garantissem a conservação e a expansão dos recursos ambientais.

Década de 1990

Em 1992, após dois anos de preparação, ocorreu no Rio de Janeiro uma nova Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como **ECO-92** ou **Rio-92**. Esse encontro ampliou ideias e resoluções da Conferência de Estocolmo, realizada 20 anos antes.

A ECO-92 lançou a chamada “Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima”, que entrou em vigor em 1994 e até 1997 foi ratificada por 165 países. Seu objetivo era estabilizar as concentrações de gases causadores do aumento do efeito estufa, de modo a impedir alterações no sistema climático planetário. Segundo o compromisso acertado, que ficou conhecido como **Agenda 21**, os países desenvolvidos teriam de reduzir, até o ano 2000, suas emissões de gases de efeito estufa aos níveis de 1990.

Em 1997, foi aprovado um documento chamado **Protocolo de Kyoto**. De acordo com esse protocolo, até o período entre 2008 e 2012, os países industrializados se comprometiam a reduzir em pelo menos 5% as emissões de gases do efeito estufa (em relação aos níveis de 1990). O gás carbônico representa mais de 85% dos gases do efeito estufa liberados na atmosfera. Se a meta fosse atingida, haveria uma reversão da tendência histórica de crescimento das emissões, iniciada há cerca de 150 anos, como resultado da Revolução Industrial. O Protocolo de Kyoto contém orientações para que os governos dos países industrializados possam colaborar para garantir um planeta saudável para as futuras gerações.

Década de 2000

Em 2001 e 2002, foram feitos complementos ao Protocolo de Kyoto e ele foi ratificado por muitos países. Cumpre lembrar que um dos maiores emissores de gases do efeito estufa, os EUA, não assinaram o protocolo.

Também em 2002 ocorreu, em Johanesburgo (África do Sul), a Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, encontro que ficou conhecido como **Rio+10**. Seu principal objetivo foi tentar acelerar a aplicação da agenda ecológica mundial (Agenda 21) definida na ECO-92, ocorrida dez anos antes no Rio de Janeiro.

Em 2005, o Protocolo de Kyoto tentou adquirir força de lei internacional. Ao longo de toda a década, a agenda ambiental tornou-se mais extensa, o que indica a preocupação cada vez maior dos governos com a preservação do ambiente terrestre. Entre os diversos projetos, em 2009 foi inaugurada em Osaka (Japão) a Eco Ideas House (Casa das Ecoideias), com o objetivo de demonstrar que é possível adotar um estilo de vida em que a emissão de CO_2 seja próxima de zero. Logo depois, diversos países da Ásia, da África e das Américas adotaram iniciativas semelhantes.

Caminhos e perspectivas para as próximas décadas

Aproveite essa discussão para debater com os alunos como eles acham que seria correto se manifestar para defender seus pontos de vista em relação ao meio ambiente.

Para as próximas décadas, podemos esperar avanços na compreensão de muitos problemas ambientais e em suas soluções. A poluição do ar, relacionada principalmente à queima de combustíveis fósseis, tenderá a diminuir à medida que a humanidade desenvolver fontes de energia mais "limpas". Entre elas, a energia geotérmica (obtida do calor da Terra), a energia solar e a energia eólica são alternativas bastante promissoras. Em dezembro de 2015 ocorreu a 21ª Conferência do Clima (COP 21), em Paris. O principal objetivo desse encontro foi obter um acordo mais consistente entre os países para diminuir a emissão de gases de efeito estufa, que causam aquecimento atmosférico e aumento da temperatura global. (Fig 12.12)

O controle das emissões de gases do efeito estufa é um dos importantes desafios desta década e das próximas. Se a temperatura na superfície da Terra se elevar acima dos limites razoáveis, o que parece estar acontecendo, podem-se esperar mudanças climáticas consideráveis e possíveis transtornos às populações humanas, não apenas em cidades litorâneas.

De 2011 a 2020, o "clima" não está otimista quanto ao aumento do efeito estufa e da temperatura média global. O Protocolo de Kyoto, ainda não assinado pelos EUA, perde força e importância e é cada vez menos respeitado pelos signatários.

Um relatório das Nações Unidas prevê que, na melhor das hipóteses, em 2020 o planeta terá 6 bilhões de toneladas de CO_2 além do limite para evitar aquecimento atmosférico menor que 2 °C.

O problema do aquecimento atmosférico preocupa; embora ainda haja otimismo, terá de haver muito empenho para que a Terra não chegue em 2100 com 5 °C a mais na temperatura média global, o que certamente traria grandes transtornos à humanidade.

Outro desafio a ser enfrentado é a conservação dos ecossistemas naturais e dos mananciais de água potável. A conservação da água depende, entre outros fatores, de não poluir e não desmatar áreas relacionadas aos mananciais, além de tratar e reaproveitar a água utilizada por pessoas e indústrias. A própria mentora do conceito de desenvolvimento sustentável, a norueguesa Gro H. Brundtland, já não parece tão otimista quanto estava no fim da década de 1980. Em entrevista[1] ao jornal *Folha de S.Paulo* em 2012, Brundtland comenta que o desenvolvimento sustentável ainda não foi implantado em nenhum lugar do mundo e critica o abuso da noção de sustentabilidade. Entretanto, afirma que isso não é motivo para deixar de lado os ideais da sustentabilidade ambiental.

MARTIN BUREAU/AFP

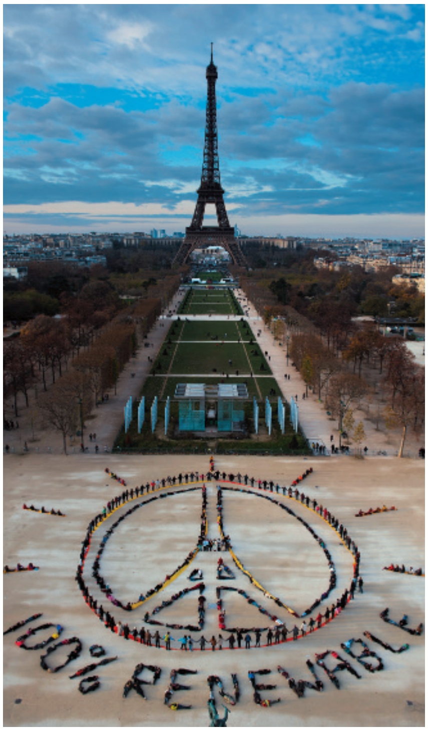


Figura 12.12 Diversas pessoas fazendo protesto com o *slogan* "100% renewable", durante a COP 21. O protesto pede a obtenção de 100% da energia mundial de fontes renováveis (Paris, França, 2015).

---

[1] Leia a entrevista em: <www1.folha.uol.com.br/ambiente/2012/03/1065497-ha-abuso-no-uso-de-sustentabilidade-diz-criadora-do-termo.shtml>. Acesso em: abr. 2016.

Alternativas energéticas

Ao apresentar o gráfico, discuta os efeitos de cada fonte energética e as possíveis alternativas mais “limpas”. Pode ser interessante comentar também sobre outros tipos de iniciativas para reduzir o uso de combustíveis fósseis, como o incentivo ao transporte coletivo e a utilização de bicicleta para o deslocamento urbano.

A civilização contemporânea tem como base um alto consumo de energia. Pense nas indústrias, nos transportes, nos eletrodomésticos e nas telecomunicações, que dependem de processos e de equipamentos em que se utilizam várias formas de energia. Atualmente, a maior parte da energia empregada nas sociedades industrializadas provém de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo.

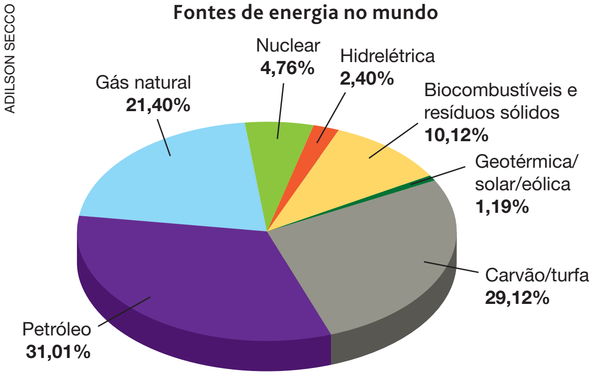


Gráfico que mostra o percentual das várias fontes de energia utilizadas no mundo em 2013. (Elaborado com base nos dados da International Energy Agency – IEA.)

Os combustíveis fósseis são **recursos não renováveis** e se esgotarão em um futuro relativamente próximo; sua duração depende do uso responsável que se fizer deles. Além disso, o uso desses combustíveis causa diversos problemas ambientais. Assim, é imperiosa a pesquisa de formas alternativas de produção de energia.

A hidreletricidade é produzida pela passagem de água por turbinas, que convertem a energia cinética da água em energia elétrica. Embora seja uma das formas menos poluentes de obtenção de energia, a usina hidrelétrica não deixa de causar impacto negativo sobre o ambiente, pois sua construção requer o desvio de cursos de rios e alagamento de extensas regiões, o que pode provocar alterações no clima e acarretar o desaparecimento de comunidades biológicas que habitam a área que será alagada.

A energia nuclear é obtida pelo emprego de substâncias denominadas “combustíveis nucleares”, cujos núcleos atômicos são desintegrados no interior dos reatores de fissão nuclear, nas usinas nucleares. Esse tipo de tecnologia para produzir energia tem se mostrado arriscado: diversos acidentes já ocorreram e não se sabe o que fazer com o “lixo radioativo”, extremamente perigoso, produzido pelas usinas nucleares. Os altos riscos têm levado inúmeros países a deixar de investir nesse tipo de alternativa energética.

Os **combustíveis renováveis**, como o álcool etílico (etanol), o biodiesel e o gás natural produzido por biodigestão, constituem alternativas viáveis para suprir parte da demanda energética. O Brasil foi o primeiro país a utilizar em larga escala o etanol, obtido a partir da fermentação da cana-de-açúcar, como combustível de automóveis; atualmente, incentiva-se o uso do biodiesel, produzido principalmente a partir do óleo de certas sementes como substituto do *diesel* obtido do petróleo.

Nesse sentido, é importante o desenvolvimento de formas mais eficientes para a produção desses combustíveis para evitar o desmatamento e a redução da produção de alimento. Uma das alternativas energéticas é o aproveitamento de energia solar, que pode ser transformada em energia elétrica e acumulada ou mesmo utilizada diretamente para o aquecimento de água.

Ainda em fase inicial no Brasil, mas já amplamente utilizado em países como Estados Unidos, Alemanha e Dinamarca, seguidos pela Índia e Espanha, está o aproveitamento da energia eólica (energia dos ventos), uma promissora perspectiva para o nosso país substituir fontes de energia que têm impactos negativos sobre o ambiente.

A
DELFIM MARTINS/PULSAR IMAGENS
B
ROGERIO REIS/TYBA
C
ALEX LARBAC/TYBA

A. Usina hidrelétrica de Itaipu. (PR, 2009.) As usinas hidrelétricas têm sido alternativas energéticas para países como o Brasil, onde há muitos rios. **B.** Painel que capta a energia do Sol e a converte em energia elétrica. (Macaé, RJ, 2011.) A energia solar é uma alternativa promissora em médio prazo. **C.** Usinas nucleares Angra I e Angra II. (Angra dos Reis, RJ, 2013.) Usinas nucleares têm se mostrado perigosas, como atestam os acidentes ocorridos em diversas partes do mundo.

Ciência e cidadania

Sistema de agroflorestas é mais vantajoso na produção de orgânicos

ANTONIO CRUZ/AGÊNCIA BRASIL

A produção de alimentos orgânicos no sistema de agroflorestas, como ocorre no sítio Pinheiros, vem ganhando destaque entre produtores rurais por ser mais lucrativa e mais sustentável (Brazlândia, Distrito Federal, 2015).

1 "A produção de alimentos orgânicos no sistema de agroflorestas vem ganhando destaque entre produtores rurais e pode ser mais vantajosa a longo prazo. Segundo o extensionista rural da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal (Emater-DF), Rafael Lima de Medeiros, a agrofloresta é um ambiente mais equilibrado do ponto de vista biológico e também um sistema mais vantajoso para o agricultor, que sempre vai ter lucro com alguma colheita da área.

2 Para produzir alimentos orgânicos não é permitido ao agricultor o uso de fertilizantes sintéticos, agrotóxicos e transgênicos na lavoura, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. E mais que isso, o processo de produção deve respeitar as relações sociais e culturais e seguir os princípios agroecológicos, com o uso sustentável dos recursos naturais.

3 A produtora rural Silvia Pinheiro dos Santos adotou esse sistema em sua propriedade de 21 hectares no Núcleo Rural Alexandre Gusmão, na região de Brazlândia, no Distrito Federal. As verduras, frutas e madeiras de lei estão plantadas juntas, em consórcio, e, segundo Silvia, a biodiversidade é tão grande que evita muitas pragas e dá mais saúde para os vegetais. No terreno crescem, entre outras plantas, a hortelã, que afasta os insetos, e o feijão-guando, capaz de fixar o nitrogênio no solo.

4 'Horta é a atividade que menos dá dinheiro, a que dá mais é a fruta e o mais rentável é a madeira. Então a ideia é aposentar com aquilo ali', diz Silvia, apontando para as árvores. 'Conforme a madeira vai crescendo, vamos escolhendo o que vai ficando. As hortaliças são de imediato e é o que nós comemos', completou.

5 Silvia conta que a propriedade está há mais de 40 anos na família e que até dez anos atrás a área era toda de pasto para o gado. 'Hoje temos gado e agrofloresta. O gado não é problema, o problema é tirar tudo para colocar o pasto. Nós fizemos a agrofloresta de um jeito que daqui a um tempo vamos criar o gado lá, porque plantamos inclusive a fruta que o gado gosta de comer', disse.

6 Para Silvia, o sistema agroflorestal é uma evolução do orgânico. 'No orgânico há ainda quem plante como na cultura tradicional, uma só espécie, e o produto fica mais caro porque não se pode aplicar nada, então precisa de muita gente para fazer a limpeza. No agroflorestal, você só induz a natureza, então vai poder ter um preço mais competitivo', disse, acrescentando que utiliza a própria poda das árvores e o húmus produzido no sítio como adubos para as plantas.

7 O engenheiro agrônomo da Emater-DF, Rafael Lima de Medeiros, conta que o mercado de orgânicos está crescendo e a Emater já trabalha o programa de agroecologia como prioritário. 'No Distrito Federal, a produção está crescendo, mas as propriedades orgânicas ainda são uma parcela muito pequena. Temos mais de 5 mil propriedades rurais e pouco mais de 150 são orgânicas. Mas o número de feiras orgânicas está crescendo e mais agricultores querem aderir a essa venda', observou.

8 O engenheiro agrônomo conta ainda que a Emater trabalha também para atingir o agricultor convencional, para que ele passe a utilizar práticas mais sustentáveis, diminuindo o uso de agrotóxicos. 'Eles começam a se adequar e, no futuro, isso pode servir de incentivo para que passem definitivamente para a produção orgânica', completou."

Fonte: VERDÉLIO, A. *Sistema de agroflorestas é mais vantajoso na produção de orgânicos*. Agência Brasil. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-05/sistema-de-agroflorestas-e-mais-vantajoso-na-producao-de-organicos/>. Acesso em: mar. 2016.

Guia de leitura

Responda em seu caderno

O texto que reproduzimos traz alguns conceitos curiosos, de aplicação especializada e recente. Trata-se de uma oportunidade para aprender a interpretar corretamente textos de divulgação como esse.

1 Leia o parágrafo 1 e localize os seguintes conceitos: alimentos orgânicos e agroflorestas. Você conhece esses termos? A leitura do parágrafo permite deduzir seus significados?

2 Pela leitura do parágrafo 2 pode se deduzir o que seria, para o autor, um "alimento orgânico". Defina alimento orgânico de acordo com o que o parágrafo apresenta.

3 Ainda com relação ao segundo parágrafo do texto, note que se comenta o conceito de sustentabilidade. Com base em conhecimentos adquiridos no livro e em outras fontes, o que significa esse conceito?

4 Leia o terceiro parágrafo, no qual se fala que as plantas da propriedade citada são cultivadas em consórcio, o que confere vantagens. Cite uma vantagem apresentada no texto e comente-a.

5 Leia o parágrafo 4 e tente reescrevê-lo de forma mais objetiva.

6 Pela leitura dos parágrafos 5 e 6, conseguimos deduzir um pouco mais do significado do conceito de agroflorestal. O que seria, para você e até este ponto da leitura, um sistema agroflorestal?

7 No parágrafo 7, o engenheiro da Emater do Distrito Federal refere-se diversas vezes ao cultivo orgânico. Em sua opinião, o que ele quis dizer em cada caso?

8 No parágrafo 8, o último do texto, fala-se que o projeto da Emater tenta também atingir o agricultor tradicional, procurando incentivá-lo a adotar a produção orgânica. O que seria, na visão do texto, um agricultor tradicional e em que consistiria sua "conversão" para a agricultura orgânica?

ATIVIDADES

Revendo conceitos, fatos e processos

Registre em seu caderno

1. A noção de desenvolvimento sustentável, ou sustentabilidade, refere-se 1. b

a) à capacidade inesgotável dos recursos que sustentam a humanidade.
b) à utilização dos recursos do ambiente tendo em mente sua preservação para gerações futuras.
c) à reivindicação dos países em desenvolvimento de serem sustentados pelos países ricos.
d) à ideia de que países ricos vêm sendo sustentados pelos recursos obtidos dos países pobres.

2. Lançar no ambiente substâncias ou agentes físicos perigosos à saúde humana e de outros organismos é o que se denomina 2. d

a) efeito estufa.
b) eutrofização.
c) inversão térmica.
d) poluição.

3. Um dos principais poluentes atmosféricos nas metrópoles, que afeta a hemoglobina do sangue e cuja principal fonte emissora são os automóveis, é o 3. d

a) dióxido de carbono (CO_2).
b) dióxido de enxofre (SO_2).
c) metano (CH_4).
d) monóxido de carbono (CO).

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 4 e 5.

a) Construção de usinas hidrelétricas.
b) Construção de usinas nucleares.
c) Liberação de clorofluorcarbonetos (CFCs).
d) Queima de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão.

4. Qual das atividades humanas mais tem contribuído para o agravamento do efeito estufa? 4. d

5. Qual dessas atividades mais tem contribuído para a destruição da camada de ozônio na estratosfera? 5. c

6. Das alternativas a seguir, apenas uma não é consequência direta do desmatamento. Qual é ela? 6. a

a) Chuva ácida.
b) Diminuição da biodiversidade.
c) Empobrecimento do solo em minerais.
d) Erosão.

7. Um lago com uma cadeia alimentar constituída de plâncton, plantas aquáticas, caramujos, pequenos peixes e aves aquáticas carnívoras teve suas águas contaminadas pelo inseticida DDT, que tem a característica de se acumular no corpo dos seres vivos. Em qual dos constituintes da cadeia alimentar espera-se encontrar a maior concentração desse inseticida? 7. a

a) Aves aquáticas.
b) Caramujos.
c) Peixes.
d) Plâncton.

Questões para exercitar o pensamento

Registre em seu caderno

8. A emissão de poluentes por automóveis e indústrias é mais ou menos constante ao longo do ano; entretanto, nos grandes centros industriais brasileiros, têm-se verificado níveis alarmantes de poluentes atmosféricos junto ao solo, principalmente nos meses mais frios. Explique detalhadamente a razão disso.

9. Suponha que um lago receba grande volume de esgotos domésticos, constituídos basicamente por resíduos orgânicos. Que efeito positivo teria um grande motor de pás que movimentasse a água, causando sua oxigenação?

Faça você mesmo!

Registre em seu caderno

10. **Pesquisa e debate: Princípios para uma sociedade sustentável**

Releia, no capítulo, o texto do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) sobre os princípios para uma sociedade sustentável. Observe que cada um dos itens exige aprofundamento e reflexão, dada sua complexidade. Debata com os colegas as ideias contidas no texto. Em seguida, aplique suas discussões no levantamento de aspectos práticos da questão.

Para isso, pesquise ações governamentais e particulares em prol da sustentabilidade. Em seguida, pense nas ações positivas que você e os membros de sua escola e de sua comunidade poderiam realizar em favor da sustentabilidade, por exemplo: não desperdiçar água na escola e separar os tipos de lixo para reciclagem. Lembre-se de que, em muitos casos, são as ações individuais que se integram na solução de um grande problema. Como diz, com propriedade, um conhecido jargão ambientalista: “Pensar globalmente, agir localmente”. Elabore, com seu grupo de trabalho, murais e painéis que ilustrem os princípios da sustentabilidade e sua importância para o futuro da humanidade.

11. **Pesquisa: O problema do lixo**

O problema do lixo urbano assume proporções cada vez maiores. Por isso, em vez de simplesmente enterrar ou incinerar os resíduos – que são, em geral, os destinos mais comuns –, é preciso buscar alternativas. A reciclagem é uma das principais soluções alternativas para o tratamento de determinados tipos de resíduos.

Pesquise a respeito da triagem doméstica, da coleta seletiva e da reciclagem do lixo. Se possível, tente descobrir iniciativas da prefeitura de sua cidade em relação a esses assuntos. Além disso, forme um grupo com seus colegas e liste o que poderia ser feito em sua escola ou comunidade para proporcionar uma produção mais racional de resíduos e sua reciclagem. Leve em conta as seguintes questões iniciais:

- Há cestos de lixo diferenciados que permitam a triagem do lixo reciclável?
- Valeria a pena realizar uma ampla campanha de conscientização sobre o problema do lixo?

Discuta essas e outras questões que certamente surgirão com os colegas e o professor.

A Biologia no vestibular e no Enem

Registre em seu caderno

Questões objetivas

1. (Enem-MEC)

> A atmosfera terrestre é composta pelos gases nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), que somam cerca de 99%, e por gases traços, entre eles o gás carbônico (CO_2), vapor de água (H_2O), metano (CH_4), ozônio (O_3) e o óxido nitroso (N_2O), que compõem o restante 1% do ar que respiramos. Os gases traços, por serem constituídos por pelo menos três átomos, conseguem absorver o calor irradiado pela Terra, aquecendo o planeta. Esse fenômeno, que acontece há bilhões de anos, é chamado de efeito estufa. A partir da Revolução Industrial (século XIX), a concentração de gases traços na atmosfera, em particular o CO_2, tem aumentado significativamente, o que resultou no aumento da temperatura em escala global. Mais recentemente, outro fator tornou-se diretamente envolvido no aumento da concentração de CO_2 na atmosfera: o desmatamento.
>
> BROWN, I. F.; ALECHANDRE, A. S. Conceitos básicos sobre clima, carbono, florestas e comunidades. In: MOREIRA, A. G.; SCHWARTZMAN, S. *As mudanças climáticas globais e os ecossistemas brasileiros*. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2000 (adaptado).

Considerando o texto, uma alternativa viável para combater o efeito estufa é 1. c

a) reduzir o calor irradiado pela Terra mediante a substituição da produção primária pela industrialização refrigerada.

b) promover a queima da biomassa vegetal, responsável pelo aumento do efeito estufa devido à produção de CH_4.

c) reduzir o desmatamento, mantendo-se, assim, o potencial da vegetação em absorver o CO_2 da atmosfera.

d) aumentar a concentração atmosférica de H_2O, molécula capaz de absorver grande quantidade de calor.

e) remover moléculas orgânicas polares da atmosfera, diminuindo a capacidade delas de reter calor.

2. (Fuvest-SP) Considere as seguintes atividades humanas:

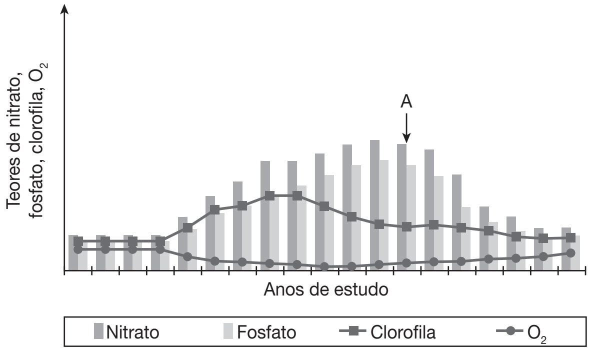
I. Uso de equipamento ligado à rede de energia gerada em usinas hidrelétricas.
II. Preparação de alimentos em fogões a gás combustível.
III. Uso de equipamento rural movido por tração animal.
IV. Transporte urbano movido a álcool combustível.

As transformações de energia solar, por ação direta ou indireta de organismos fotossintetizantes, ocorrem exclusivamente em 2. c

a) I.
b) II.
c) II, III e IV.
d) III e IV.
e) IV.

Questão discursiva

3. (Unicamp-SP) Desde o início do crescimento habitacional desordenado às margens de uma represa, suas águas vêm sendo analisadas periodicamente em relação aos teores de nitrato, fosfato, clorofila e oxigênio dissolvido, em virtude do crescente despejo de esgotos sem tratamento. Após a ocorrência da morte de um grande número de peixes, a comunidade ribeirinha pediu às autoridades que fossem instaladas tanto a rede de esgotos quanto uma estação de tratamento dos resíduos. Os resultados obtidos em relação aos fatores citados, antes e após a instalação da rede e estação de tratamento de esgotos, estão representados na figura abaixo. A instalação da estação de tratamento ocorreu em A.



ADILSON SECCO

a) Que relação existe entre as análises realizadas e a poluição das águas por esgotos domésticos? De que forma os fatores analisados (mostrados na figura) estão relacionados com a mortalidade de peixes?

b) As autoridades garantiram à população ribeirinha que a instalação da estação de tratamento de esgotos permitiria que as águas da represa voltassem a ser consideradas de boa qualidade. Com base nos resultados mostrados na figura, justifique a afirmação das autoridades.

Lista de siglas

Enem-MEC – Exame Nacional do Ensino Médio

Fuvest-SP – Fundação Universitária para o Vestibular

PUC-Campinas-SP – Pontifícia Universidade Católica de Campinas

PUC-Minas – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (em uso a partir de 2002)

PUC-RS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Uece – Universidade Estadual do Ceará

UEG-GO – Universidade Estadual de Goiás

UEL-PR – Universidade Estadual de Londrina

Uerj – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Ufal – Universidade Federal de Alagoas

UFC-CE – Universidade Federal do Ceará

Ufes – Universidade Federal do Espírito Santo

UFG-GO – Universidade Federal de Goiás

UFJF-MG – Universidade Federal de Juiz de Fora

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFMS – Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

UFPA – Universidade Federal do Pará

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UFRGS-RS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UFRR – Fundação Universidade Federal de Roraima

UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

UFSCar-SP – Fundação Universidade Federal de São Carlos

UFSM-RS – Universidade Federal de Santa Maria

UFS-SE – Fundação Universidade Federal de Sergipe

UFU-MG – Fundação Universidade Federal de Uberlândia

UFV-MG – Fundação Universidade Federal de Viçosa

Unesp – Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”

Unicamp-SP – Universidade Estadual de Campinas

Unifal-MG – Universidade Federal de Alfenas

Unifesp – Universidade Federal de São Paulo

Unifor-CE – Universidade de Fortaleza

Vunesp – Fundação para o Vestibular da Unesp

Bibliografia

AB'SÁBER, A. N. *Os domínios de natureza no Brasil*: potencialidades paisagísticas. Cotia: Ateliê, 2003.

ALBERTS, B.; JOHNSON, A.; LEWIS, J.; RAFF, M.; ROBERTS, K.; WALTER, P. *Biologia molecular da célula*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. *Ecology*: from individuals to ecosystems. 4. ed. Oxford: Wiley--Blackwell, 2005.

BEIGUELMAN, B. *O estudo de gêmeos*. Disponível em: <www.desvirtual.com/bbeiguel/ebook.htm>. Acesso em: abr. 2016.

BRONOWSKI, J. *Ciência e valores humanos*. Trad. Alceu Letal. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Edusp, 1979.

CAMPBELL, N. A.; REECE, J. B.; URRY, L. A.; CAIN, M. L.; WASSERMANN, S. A.; MINORSKY, P. V.; JACKSON, R. B. *Biologia*. 8. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CARLSON, E. A. *The gene*: a critical history. Philadelphia: W. B. Saunders Co., 1966.

CARROLL, S. B. *Endless forms most beautiful*. Nova York: W. W. Norton & Co., 2005.

COOPER, G. M. *The Cell*: A Molecular Approach. 4. ed. Sunderland (MA): Sinauer, 2006.

DAJOZ, R. *Ecologia geral*. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 1978.

DARWlN, C. *A origem das espécies*. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Edusp, 1985.

DAVIS, B. D. *The genetic revolution*. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1991.

DAWKINS, R. *A escalada do Monte Improvável*: uma defesa da teoria da evolução. São Paulo: Cia. das Letras, 1998.

__________. *A magia da realidade*. São Paulo: Cia. da Letras, 2012.

__________. *The greatest show on earth*. Nova York: Free Press, 2009.

DOBZHANSKY, T. *Genética do processo evolutivo*. São Paulo: Polígono/Edusp, 1973.

DORST, J. *Antes que a natureza morra*. São Paulo: Edgard Blücher/Edusp, 1973.

EHRLICH, A. H. The human population: size and dynamics. *American Zoologist*, v. 25, p. 395-406, 1985.

EHRLICH, P. R. *The machinery of nature*. Nova York: Simon & Schuster, 1987.

EHRLICH, P.; EHRLICH, A. H. *População, recursos e ambiente*. São Paulo: Polígono/Edusp, 1974.

ENERGY FLOW THROUGH ECOSYSTEMS (unidades 2 e 3). Producers and consumers. The Open University, Third Level Course. Londres: The Open University, 1974.

ENERGY FLOW THROUGH ECOSYSTEMS (unidades 4 e 5). Decomposers: whole ecossystems. The Open University, Third Level Course. Londres: The Open University, 1974

FARREL, J. *A assustadora história das pestes e epidemias*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003.

FRICKE, H. *Coelacanthus*: The Fish that Time Forgot. *National Geographic*, 173, p. 824-838, 1988.

FUTUYAMA, D. J. *Biologia evolutiva*. 2. ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992.

GAMUN, L.; VINES, G. *The evolution of life*. Oxford: Oxford University Press, 1991.

GOULD, S. J. Evolution as fact and theory. *Discover 2*, p. 34-37, 1981.

__________. *Quando as galinhas tiverem dentes*. Lisboa: Gradiva, 1989.

__________. *Vida maravilhosa*. São Paulo: Cia. das Letras, 1990.

__________. *Viva o brontossauro!* São Paulo: Cia. das Letras, 1992.

GRANT, P. R. Natural selection and Darwin's finches. *Scientific American*, v. 265, p. 60-65, 1991.

GRIFFITHS, A. J. F.; GELBART, W. M.; MILLER, J. H.; LEWONTIN, R. C. *Modern Genetics Analysis*. Nova York: W. H. Freeman, 1998.

GRIFFITHS, A. J. F.; WESSLER, S. R.; LEWONTIN, R. C.; CARROLL, S. B. *Introdução à Genética*. 9. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009.

HARRISON, G. A.; WEINER, J. S.; TANNER, J. M.; BARNICOT, N. A. *Human Biology*. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1977.

HAUSMANN, R. *História da Biologia Molecular*. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1997.

HECHT, J. People and chimps belong together on the family tree. *New Scientist*, n. 2.396, p. 15, 2003.

HOLLEY, D. *Animals alive! An ecological guide to animal activities*. Niwot: Roberts Rinehart Publishers, 1994.

HUECK, K. *As florestas da América do Sul*. São Paulo: Polígono; Brasília: Editora da UnB, 1972.

JACOB, F. *A lógica da vida*: uma história da hereditariedade. Rio de Janeiro: Graal, 1983.

LEAKEY, M.; WALKER, A. Os primeiros fósseis hominídeos da África. *Scientific American Brasil*, edição especial: Novo olhar sobre a evolução humana, n. 2, p. 16-21, 2003.

MADER, S. S. *Biology*. 8. ed. Boston: McGraw-Hill, 2004.

MAYNARD SMITH, J. *The Problems of Biology*. Oxford: Oxford University Press, 1986.

MAYR, E. *The Growth of Biological Thought*: Diversity, Evolution, and Inheritance. Cambridge (MA): Cambridge University Press/The Belknap Press, 1982.

__________. *What evolution is*. New York: Basic Books, 2002.

MEYER, D. E. (supervisor). *Biological science, a molecular approach*. 4. ed. Lexington: D. C. Heath and Company, 1980.

MOONEY, P. R. *O escândalo das sementes*: o domínio na produção de alimentos. São Paulo: Nobel, 1987.

MOORE, J. A. Science as a way of knowing – Evolution Biology. *American Zoologist*, v. 24, p. 467-534, 1984.

__________. Science as a way of knowing – Genetics. *American Zoologist*, v. 26, p. 583-747, 1986.

MOZETO, A. A. Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. Cadernos temáticos de *Química Nova na Escola*. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/atmosfera.pdf>. Acesso em: abr. 2016.

NEVES, W. A.; HUBBE, M. Luzia e a saga dos primeiros americanos. *Scientific American Brasil*, edição especial: Novo olhar sobre a evolução humana, n. 2, p. 64-71, 2003.

OLBY, R. *Origins of Mendelism*. 2. ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1985.

OREL, V. *Gregor Mendel*: the first geneticist. Oxford: Oxford University Press, 1996.

PARECER, S.; AHMADJIAN, V. *Symbiosis*: An Introduction to Biological Associations. 2. ed. Nova York: Oxford University Press, 2000.

PERONSE, L. S.; SMITH, G. F. *Down's Anomaly*. Boston: Little Brown, 1966.

PHILLIPSON, J. *Ecologia energética*. São Paulo: Companhia Editora Nacional/Edusp, 1969.

PORTUGAL, F. H.; COHEN, J. S. *A century of DNA*. Massachusetts: The MIT Press, 1977.

POSTGATE, J. *Microbes and Man*. 4. ed. Cambridge (MA): Cambridge University Press, 2000.

RAMALHO, M.; SANTOS, J. B.; PINTO, C. B. *Genética na agropecuária*. 4. ed. São Paulo: Globo, 1995.

RAW, I.; MENNUCCI, L.; KRASILCHIK, M. *A Biologia e o homem*. São Paulo: Edusp, 2001.

RICKLEFS, R. E. *A economia da natureza*. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

RIDLEY, M. *Evolução*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

ROSE, M. *O espectro de Darwin*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

RUSE, M. *Levando Darwin a sério*: uma abordagem naturalística da filosofia. Belo Horizonte: Itatiaia, 1995.

SCHMITZ, J.; OHME, M.; SURYOBROTO, B.; ZISCHLER, H. The Colugo (*Cynocephalus variegatus*, Dermoptera): The Primates' Gliding Sister? *Molecular Biology and Evolution*, v. 19, p. 2.308-2.312, 2002.

SINNOT, E. W.; DUNN, L. C.; DOBZHANSKY, T. *Princípios de Genética*. Barcelona: Ediciones Omega, 1961.

SPROULE, A. *Charles Darwin*. Rio de Janeiro: Globo, 1993.

STEBBINS, G. L. *Processos de evolução orgânica*. 2. ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos/Edusp, 1974.

SUZUKI, D.; KNUDTSON, P. *Genethics the ethics of engineering life*. New South Wales: Allen & Unwin Australia Pty Ltd., 1992.

VINES, G. Mass Extinctions. *New Scientist*, v. 164, n. 2.216, p. 1-4, 1999.

WALKER, G. Ice Magic. *New Scientist*, v. 178, n. 2.390, p. 30-34, 2003.

WHITFIELD, P. *From so simple a beginning*: the book of evolution. Nova York: Macmillan, 1993.

ZIMAN, J. *Conhecimento público*. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Edusp, 1979.

ZIMMER, C. *O livro de ouro da evolução*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004.

Sugestões de livros, *sites* e vídeos

Módulo 1 Fundamentos da Genética

Impresso

Watson & Crick: a história da descoberta da estrutura do DNA, de Ricardo Ferreira. São Paulo: Odysseus, 2003.

O livro traz uma exposição acadêmica fundamentada e apresenta a importância, na cultura moderna, do trabalho inovador de Watson e Crick.

Clonagem: da ovelha Dolly às células-tronco, de Lygia da Veiga Pereira. São Paulo: Moderna, 2005.

O livro procura explicar o que é clonagem, como e com quais objetivos é feita. Além disso, levanta uma série de questões científicas e éticas sobre as novas tecnologias, diferenciando a clonagem reprodutiva da clonagem terapêutica.

Internet

História de um sucesso e duas tragédias. *Ciência Hoje*.

O artigo resgata o papel de cientistas "esquecidos" na descoberta da estrutura do DNA.

Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/especiais/estrutura-do-dna-50-anos-de-uma-revolucao/historia-de-um-sucesso-e-duas-tragedias>.
Acesso em: abr. 2016.

Clonagem x transgenia. Revista *Nova Escola*.

Infográfico que compara as duas técnicas, clonagem e transgenia.

Disponível em: <http://revistaescola.abril.com.br/img/ciencias/228-sala-ciencias.jpg>.
Acesso em: abr. 2016.

Vídeos

Mendel e a ervilha. *National Geographic Channel*.

São três vídeos que buscam recriar a vida e os trabalhos de Gregor Mendel, conhecido como "pai da Genética".

Parte 1: A estranha ervilha na vagem. Disponível em: <www.youtube.com/watch?v=tfjDJE4kWhM>.

Parte 2: A simples ervilha. Disponível em: <www.youtube.com/watch?v=VVlr37xPkk0>.

Parte 3: Minha hora chegará. Disponível em: <www.youtube.com/watch?v=hEdc96wxyZ8>.

Acessos em: abr. 2016.

Você consegue enrolar a língua? Revista *Pesquisa Fapesp*.

Algumas pessoas conseguem enrolar a língua como um tubo; para outras, isso é impossível. Pode haver variação mesmo entre gêmeos idênticos.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/08/23/voc%c3%aa-consegue-enrolar-a-l%c3%adngua>.
Acesso em: abr. 2016.

Módulo 2 A evolução biológica

Impresso

Darwin no Brasil, de Flávio de Almeida. São Paulo: Vieira & Lent, 2009.

História em quadrinhos que descreve os principais fatos da viagem de Darwin ao Brasil, em 1832.

A deriva dos continentes, de Samuel Murgel Branco e Fábio Cardinale Branco. São Paulo: Moderna, 2004.

Nesse livro, são abordados assuntos desde as visões clássicas sobre a estrutura do planeta até as modernas teorias, que relacionam a chamada tectônica de placas com a configuração atual dos continentes, oceanos e ecossistemas abissais.

Internet

Descobertas de dinossauros ao acaso. *Ciência Hoje*.

O autor do artigo afirma que nem todos os achados paleontológicos são feitos por cientistas. Muitos se devem a moradores que encontram ossos distintos nos locais onde vivem.

Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/cacadores-de-fosseis/descobertas-de-dinossauros-ao-acaso>.
Acesso em: abr. 2016.

Uma viagem de descobertas. Revista *Nova Escola*.

O infográfico animado mostra a viagem do pesquisador Charles Darwin a vários pontos da Terra para uma investigação científica, que deu origem à teoria da evolução.

Disponível em: <http://revistaescola.abril.com.br/ciencias/fundamentos/viagem-descobertas-432334.shtml>.
Acesso em: abr. 2016.

Vídeos

Ramificações ancestrais nos macacos-pregos. Revista *Pesquisa Fapesp*.

Criando e manipulando ferramentas que os ajudam a quebrar cascas, cutucar lagartos e aranhas – e até a paquerar! –, os macacos-pregos mostram como tradições culturais podem evoluir e ser criadas entre animais.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/08/21/ramifica%c3%a7%c3%b5es-ancestrais-dos-macacos-prego>.
Acesso em: abr. 2016.

Módulo 3 Fundamentos da Ecologia

Impresso

População e ambiente: desafios à sustentabilidade, de Daniel Joseph Hogan. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

Essa série apresenta análises do impacto do conceito de desenvolvimento sustentável no Brasil e tem como objetivo analisar o que está sendo feito para evitar um crescimento populacional sem controle e uma industrialização predatória, cuja ênfase esteja apenas no crescimento econômico, bem como o que pode ser feito para reduzir a poluição e os impactos ambientais em geral, aumentar a produção de alimentos sem destruir as florestas e evitar a exaustão dos recursos naturais por meio do uso de fontes de energia de outros produtos renováveis.

Vivendo no cerrado e aprendendo com ele, de Marcelo Bizerril. São Paulo: Saraiva, 2004.

O cerrado é considerado uma área crítica para a conservação no mundo. Nessa obra, o autor revela que os vegetais do cerrado têm enorme potencial alimentício, medicinal e madeireiro e que parte de sua fauna pode ser criada e manejada com fins econômicos. O livro aborda também os grupos indígenas que habitam a região e traz informações arqueológicas sobre a presença do homem ali há cerca de 11 mil anos.

O desafio do desenvolvimento sustentável, de Roberto Giansanti. São Paulo: Atual, 2004.

Esse livro foi organizado a partir de três eixos centrais – a constituição das sociedades modernas; a relação entre os processos de modernização econômica e a emergência de impactos ambientais; e a possibilidade de combinar desenvolvimento com uso e gestão racional dos recursos naturais.

Internet

Pioneira centenária. Revista *Pesquisa Fapesp*.

O artigo trata da recuperação das araucárias em áreas desmatadas e da importância dessa árvore para o ecossistema local.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2010/12/05/pioneira-centen%c3%a1ria>.
Acesso em: abr. 2016.

De gaiato no navio. Revista *Pesquisa Fapesp*.

O artigo é sobre navios que atravessam os oceanos e são vetores de espécies biológicas invasoras.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2011/08/30/de-gaiato-no-navio>.
Acesso em: abr. 2016.

Jardineiras fiéis. Revista *Pesquisa Fapesp*.

O artigo é sobre a interação entre formigas e plantas, salientando o papel desses animais na germinação das sementes.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/08/17/jardineiras-fi%C3%A9is>.
Acesso em: abr. 2016.

Mar à vista: uma viagem pelo litoral brasileiro. Alô Escola – TV Cultura.

Série da TV Cultura que compila informações de três meses de viagens, da foz do Rio Parnaíba (MA) à foz da Lagoa dos Patos (RS), passando pela Ilha de Trindade, o ponto mais distante do mar territorial brasileiro. Trata-se de um trabalho de pesquisa que nos mostra um pouco da vida nos oceanos e nos alerta para as ações humanas que podem provocar o desequilíbrio ecológico dos sistemas marinhos.

Disponível em: <http://www2.tvcultura.com.br/aloescola/ciencias/maravista/index.htm>.
Acesso em: abr. 2016.

Reciclar é preciso. *Portal Fiocruz*.

Esse artigo trata da importância da reciclagem dos plásticos, material presente nas embalagens dos mais diversos produtos de uso cotidiano, como xampus, iogurtes e sacolinhas plásticas.

Disponível em: <www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1166&sid=8>.
Acesso em: abr. 2016.

Aquecimento global. Revista *Veja*.

Reportagem especial sobre o aquecimento global, com infográficos, perguntas e respostas às dúvidas mais frequentes.

Disponível em: <http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/aquecimento_global/contexto.html>.
Acesso em: abr. 2016.

Vídeos

As saúvas: uma sociedade de formigas. Revista *Pesquisa Fapesp*.

O vídeo foi produzido por uma aluna de Biologia como parte de seu projeto de iniciação científica na Universidade de São Paulo (IB-USP) em 2008.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2009/12/21/as-sa%c3%bavas-uma-sociedade-de-formigas>.
Acesso em: abr. 2016.

SUPLEMENTO PARA O PROFESSOR

APRESENTAÇÃO

Prezado colega

Neste **Suplemento para o professor**, apresentamos esta obra, em três volumes, destinada ao ensino médio. Idealizados como instrumentos de apoio didático a professores e estudantes, os livros têm por objetivo trazer informações e princípios relevantes sobre diversos temas biológicos.

Esta coleção espera atender às diferentes opções de conteúdo adotadas por professores do ensino médio de todo o Brasil. A amplitude dos assuntos tratados procura contemplar os conteúdos tradicionalmente trabalhados pela maioria dos colegas de disciplina. Esperamos que cada professor utilize os volumes de acordo com seu projeto pedagógico, sua disponibilidade e seus recursos.

Ao elaborar a obra, tivemos em mente promover o interesse dos estudantes por temas biológicos fundamentais e integrar a visão científica ao dia a dia. Além disso, ressaltamos a importância das Ciências Biológicas para a humanidade e as expectativas de novas descobertas, que certamente permitirão avanços na qualidade de vida das pessoas.

A seguir apresentamos esta obra didática com algumas sugestões para sua utilização. Essas sugestões podem ser vistas como pontos de partida e exemplos para você aplicar suas estratégias didáticas desenvolvidas em sua experiência como professor. Seu trabalho consiste em formar jovens envolvidos na aventura do conhecimento humano e capazes de pensar e discutir os alcances e as limitações do empreendimento científico. Esperamos que esta obra possa ajudá-lo nesse grande desafio.

Os autores

SUMÁRIO

1. A Biologia no ensino médio 293

2. Características desta obra 295

Organização geral 295

Organização dos capítulos 295

Texto e imagens 295

Ciência e cidadania em destaque 295

Amplie seus conhecimentos 296

Atividades didáticas e avaliação 296

3. Utilização dos capítulos da obra 297

4. Referências bibliográficas 300

5. Sugestões de leitura didático-pedagógica 301

6. Destaques temáticos, habilidades e sugestões para o volume do 3º ano 302

MÓDULO 1 FUNDAMENTOS DA GENÉTICA, 302

Capítulo 1 **Lei da herança genética** 302

A importância do assunto 302

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 302

Habilidades sugeridas 303

Itens principais 303

Conceitos fundamentais 303

Capítulo 2 **As bases cromossômicas da herança** 303

A importância do assunto 303

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 303

Habilidades sugeridas 304

Itens principais 304

Conceitos fundamentais 304

Capítulo 3 **Herança e sexo** 304

A importância do assunto 304

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 304

Habilidades sugeridas 305

Itens principais 305

Conceitos fundamentais 305

Capítulo 4 **Genética e biotecnologia na atualidade** 305

A importância do assunto 305

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 306

Habilidades sugeridas 306

Itens principais 306

Conceitos fundamentais 306

Competências e habilidades do Enem relacionadas ao módulo 1 307

Leituras complementares para o professor 307

MÓDULO 2 A EVOLUÇÃO BIOLÓGICA, 309

Capítulo 5 **Os fundamentos da evolução biológica** 309

A importância do assunto 309

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 310

Habilidades sugeridas 311

Itens principais 311

Conceitos fundamentais 311

Capítulo 6 **A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos** 311
A importância do assunto 311
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 311
Habilidades sugeridas 312
Itens principais 312
Conceitos fundamentais 312

Capítulo 7 **Evolução humana** 312
A importância do assunto 312
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 313
Habilidades sugeridas 313
Itens principais 313
Conceitos fundamentais 313

Competências e habilidades do Enem relacionadas ao módulo 2 314
Leituras complementares para o professor 314

MÓDULO 3 **FUNDAMENTOS DA ECOLOGIA, 316**

Capítulo 8 **O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza** 316
A importância do assunto 316
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 316
Habilidades sugeridas 317
Itens principais 317
Conceitos fundamentais 317

Capítulo 9 **A dinâmica das populações** 317
A importância do assunto 317
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 317
Habilidades sugeridas 317
Itens principais 318
Conceitos fundamentais 318

Capítulo 10 **Relações ecológicas** 318
A importância do assunto 318
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 318
Habilidades sugeridas 318
Itens principais 318
Conceitos fundamentais 318

Capítulo 11 **Sucessão ecológica e biomas** 319
A importância do assunto 319
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 319
Habilidades sugeridas 319
Itens principais 319
Conceitos fundamentais 319

Capítulo 12 **A humanidade e o ambiente** 320
A importância do assunto 320
Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo 320
Habilidades sugeridas 321
Itens principais 321
Conceitos fundamentais 321

Competências e habilidades do Enem relacionadas ao módulo 3 321
Leituras complementares para o professor 321

7. Atividades complementares 326

8. Respostas/Encaminhamentos 331

Páginas para reproduzir 345

1 A Biologia no ensino médio

Cada professor tem suas próprias concepções de ensino e aprendizagem, resultantes de sua formação acadêmica, de suas leituras e de suas relações profissionais e sociais, entre outros fatores. É importante refletir continuamente sobre a relação entre a prática em sala de aula e os fundamentos teóricos do processo de ensino-aprendizagem, adequando-os ao dinamismo do mundo contemporâneo.

O Ministério da Educação (MEC) tem apresentado propostas para ajudar o professor a refletir sobre as concepções de ensino e aprendizagem no país. Esse tema é tratado resumidamente no item "Breve histórico" do documento *Parâmetros Curriculares Nacionais* (Brasil, 1997), que comenta a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDBEN; Lei n. 9.394/1996), regulamentada em 1998 pelas Diretrizes do Conselho Nacional de Educação. A LDBEN "estabelece o ensino médio como a etapa conclusiva da educação básica de toda a população estudantil e não mais somente como uma etapa preparatória de outra etapa escolar ou do exercício profissional" (Brasil, 1997, p. 8).

Como consequência da nova lei, o ensino médio passou a constituir a etapa conclusiva da educação básica, que tem como objetivos "preparar para a vida, qualificar para a cidadania e capacitar para o aprendizado permanente, em eventual prosseguimento dos estudos ou diretamente no mundo do trabalho" (Brasil, 2000, p. 9).

A legislação brasileira tem acompanhado movimentos educacionais de outros países, que veem a formação básica não apenas como preparação para a universidade ou para o mercado de trabalho, mas principalmente como condição para o exercício pleno da cidadania em uma sociedade democrática. O projeto estadunidense de reforma educacional lançado em 1985 pela Associação Americana para o Progresso da Ciência, por exemplo, tem como principal objetivo a alfabetização científica da população daquele país. Esse projeto define a pessoa cientificamente educada como aquela "que tem consciência de que a Ciência, a Matemática e a tecnologia são empreendimentos humanos interdependentes, com poderes e limitações; que compreende conceitos-chave e princípios das ciências; que está familiarizada com o mundo natural e reconhece tanto sua diversidade quanto sua unidade; que utiliza o conhecimento e o modo de pensar científicos com objetivos individuais e sociais" (AAAS, 1990, p. xvii; tradução nossa).

Em 1998, em conformidade com a Lei n. 9.394/1996, o Ministério da Educação criou o Exame Nacional do Ensino Médio (Enem), com a finalidade de avaliar a aprendizagem dos estudantes em todo o país. Em 2009, a modificação do formato do exame — o novo Enem — aproximou-o ainda mais das diretrizes curriculares nacionais. Além de estar afinado com as novas propostas dos *PCN1* (veja a seguir), o novo Enem valoriza conteúdos disciplinares tradicionalmente praticados no ensino médio e permite o uso dos resultados desse exame na seleção de candidatos ao ensino superior.

Em relação ao ensino da Biologia, as orientações contidas nos *Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio* (PCNEM), de 1999, foram complementadas no documento *PCN1*, de 2002, que respondeu a críticas ao documento original, levantadas por muitos educadores. Em 2006, o MEC publicou um novo documento — *Orientações curriculares para o ensino médio* —, elaborado com base em discussões entre equipes técnicas do MEC, Secretarias de Educação, professores, estudantes da rede pública e representantes da comunidade acadêmica. Essas orientações visam fornecer "um instrumento de apoio à reflexão do professor a ser utilizado em favor do aprendizado" (Brasil, 2006, p. 6).

O documento de 2006 reconhece a contribuição do diálogo entre o professor e a escola na prática docente, como se pode ver a seguir.

> Os PCN+, propostos como orientações complementares aos PCNEM, apresentam um diálogo direto com os professores e os educadores, tornando menor a distância entre a proposição das ideias e sua execução. O texto reafirma seu compromisso com a necessidade de se articularem as competências gerais com os conhecimentos disciplinares e organiza de forma mais sistemática muitas das propostas pretendidas pelos PCNEM. Nesse sentido, o texto dos PCN+ representou um avanço, pois propõe sugestões de organização de cursos e de aulas, além de múltiplas abordagens sobre os temas da disciplina. O documento apresenta aos professores exemplos de aplicação das propostas previstas nos Parâmetros, além de permitir a criação de novas possibilidades, segundo o perfil do aluno, a realidade de cada escola e de seu projeto político-pedagógico.
>
> (Brasil, 2006, p. 17)

As *Orientações curriculares para o ensino médio* afirmam que:

> A escola, ao definir seu projeto pedagógico, deve propiciar condições para que o educando possa conhecer os fundamentos básicos da investigação científica; reconhecer a ciência como uma atividade humana em constante transformação, fruto da conjunção de fatores históricos, sociais, políticos, econômicos, culturais, religiosos e tecnológicos, e, portanto, não neutra; compreender e interpretar os impactos do desenvolvimento científico e tecnológico na sociedade e no ambiente. Trata-se, portanto, de capacitar o educando para interpretar fatos e fenômenos – naturais ou não – sob a óptica da ciência, mais especificamente da Biologia, para que, simultaneamente, adquira uma visão crítica que lhe permita tomar decisões usando sua instrução nessa área do conhecimento.
>
> (Brasil, 2006, p. 20)

As orientações contidas nos documentos oficiais, longe de menosprezar conteúdos científicos específicos, enfatizam sua importância para a compreensão do mundo natural e a formação da cidadania. O grande desafio dos professores de Biologia é utilizar os conteúdos básicos da disciplina como meios para levar o estudante a conhecer os fundamentos e a natureza dos métodos de investigação empregados pela ciência, de maneira a desenvolver uma visão científica do mundo.

A aprendizagem pressupõe a construção ativa de conhecimento por parte do estudante. Nessa visão, conhecimento não é algo que o professor simplesmente transfere para seus alunos, mas é produto da atividade intelectual do estudante, resultante do processamento das novas informações recebidas e de suas conexões com os conhecimentos já consolidados.

O documento *Ciência na escola*: um direito de todos, da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco), expressa essa linha de pensamento nos seguintes termos:

> O aprendiz precisa tornar-se o principal protagonista na construção e na apropriação do conhecimento. [...] A escola deve propor atividades que envolvam os estudantes na aprendizagem, com temas de seu interesse e que tenham relevância social. [...] Em vez de um ensino descontextualizado, baseado na memorização pura e simples, podem ser introduzidas situações-problema para que os estudantes busquem soluções.
>
> (Unesco, 2005, p. 6)

2 Características desta obra

Organização geral

Esta obra, em três volumes, visa levar os estudantes do ensino médio a conhecer e acompanhar os grandes debates científicos da atualidade.

Cada volume é dividido em módulos, com um número relativamente reduzido de capítulos, visando facilitar o acesso de professores e estudantes aos temas tratados. A divisão em módulos permite visualizar melhor as habilidades e os conteúdos a serem desenvolvidos no bimestre e no ano, permitindo uma decisão mais consciente sobre os temas que poderão ser ampliados ou reduzidos em função do tempo disponível.

O volume 1 apresenta o nível celular de organização da vida, relacionando-o, por um lado, com o nível das moléculas e, por outro, com o nível dos tecidos biológicos. Os principais assuntos tratados nesse volume são: a) características típicas do fenômeno da vida e teorias atuais sobre a origem da vida em nosso planeta; b) estrutura, função e reprodução das células vivas (Biologia Celular) e organização celular dos tecidos animais (Histologia); c) metabolismo energético e processos de obtenção de energia para a vida (fotossíntese e quimiossíntese; respiração e fermentação aeróbica); d) aspectos gerais da reprodução e do desenvolvimento embrionário animal; reprodução humana.

O volume 2 aborda a vida no nível dos organismos, estudando sua diversidade, anatomia e fisiologia. Os principais assuntos tratados nesse volume são: a) noções básicas de Sistemática e classificação biológica; b) estudo sistemático dos principais representantes dos grandes reinos de seres vivos; c) anatomia e fisiologia de vegetais e animais, com ênfase nas plantas angiospermas e no organismo humano.

O volume 3 trata de conceitos e processos mais diretamente relacionados com o nível populacional de organização dos seres vivos, estudando-os sob os pontos de vista da Genética, da Biologia Evolutiva e da Ecologia. Os principais assuntos tratados nesse volume são: a) aspectos históricos e modernos da Genética, de Gregor Mendel até os recentes avanços no conhecimento genético e suas aplicações; b) aspectos históricos e modernos das teorias de evolução biológica, de Darwin à moderna teoria evolucionista, com destaque para a evolução da espécie humana; c) conceitos fundamentais de Ecologia e de Educação Ambiental.

Organização dos capítulos

Texto e imagens

A linguagem empregada na obra procura aliar a precisão conceitual da comunicação científica com a clareza didática. Em algumas situações, foi possível empregar analogias e comparações, exemplificando com assuntos do cotidiano, de modo a tornar conceitos e fenômenos biológicos mais concretos para os estudantes.

As imagens são fundamentais para a compreensão mais ampla dos assuntos e são acompanhadas de legendas que complementam o texto básico. Além de fotografias, há esquemas com comparações didáticas e sínteses conceituais e, nesse caso, é importante levar os estudantes a perceber os elementos em diferentes escalas e o uso de cores-fantasia.

Ciência e cidadania em destaque

Diversos capítulos da obra contém um ou mais quadros denominados “Ciência e cidadania”, que destacam a presença das Ciências Naturais em nosso dia a dia e se relacionam à vida cotidiana e à cidadania. Além de ser utilizados no decorrer do estudo do capítulo, esses quadros também podem servir de introdução ou fechamento dos temas tratados. Para tanto, eles contam com o Guia de leitura, um roteiro que leva o estudante a explorar os assuntos apresentados. Adiante, comentamos aspectos pedagógicos importantes relativos ao emprego desses quadros.

Amplie seus conhecimentos

Vários capítulos incluem também quadros intitulados "Amplie seus conhecimentos", que trazem informações adicionais, curiosidades ou aprofundamentos sobre algum assunto abordado. Por constituírem ampliações do tema básico, podem ser sugeridos aos estudantes como leitura a ser feita em casa, caso disponha de pouco tempo em sala de aula.

Atividades didáticas e avaliação

Um ponto central da atividade de ensino-aprendizagem é a avaliação. No ensino orientado por competências e habilidades, a avaliação vai além da simples atribuição de notas em exames que dão prioridade aos conteúdos. Além dos resultados das tarefas didáticas, o processo avaliativo deve levar em conta também o processo de aprendizagem, ou seja, o caminho percorrido pelos estudantes na aquisição de novos conhecimentos, habilidades e competências. Uma avaliação mais ampla serve tanto para acompanhar a construção de conhecimento pelo estudante como para orientar o professor na tomada de decisões, no decorrer do trabalho pedagógico.

Ao discutir a questão avaliativa, os PCN+ consideram que:

> [...] entre outras características, o processo de avaliação deve:
>
> - retratar o trabalho desenvolvido;
> - possibilitar observar, interpretar, comparar, relacionar, registrar, criar novas soluções usando diferentes linguagens;
> - constituir um momento de aprendizagem no que tange às competências de leitura e interpretação de textos;
> - privilegiar a reflexão, a análise e a solução de problemas;
> - possibilitar que os alunos conheçam o instrumento [de avaliação], assim como os critérios de correção;
> - proporcionar o desenvolvimento da capacidade de avaliar e julgar, ao permitir que os alunos tomem parte de sua própria avaliação e da de seus colegas, privilegiando, para isso, os trabalhos coletivos.
>
> (apud Brasil, 2006, p. 40)

O processo de avaliação deve ser contínuo e não pontual. Além de avaliar o produto da aprendizagem, isto é, os resultados das tarefas didáticas, é importante também considerar o esforço do estudante na realização de tais tarefas, sua interação com o grupo de colegas, seu grau de independência intelectual e seu progresso no decorrer das atividades, entre outros fatores. Ao levar em conta esses múltiplos aspectos do processo de aprendizagem, o professor obterá subsídios para orientar seu próprio trabalho, certificando-se de que os objetivos propostos estão sendo atingidos ou verificando se há necessidade de adequar as metodologias ou de propor novas estratégias didáticas.

As formas de avaliação podem e devem ser variadas. Entre elas, destacam-se: a) provas com questões objetivas, que verificam a apropriação de conceitos e de ligações válidas entre conceitos e fatos; b) questões dissertativas, que demandam reflexão, análise, resolução de problemas e argumentação lógica, tendo por base a rede conceitual desenvolvida; c) seminários, para verificar a capacidade de defender ideias e pontos de vista com base no conhecimento adquirido; d) análise de situações-problema, que avalia a consolidação de conteúdos fundamentais e a capacidade de correlacionar teoria e prática; e) debates sobre temas polêmicos, que permitem o desenvolvimento da consciência crítica, da capacidade argumentativa, da formação ética e de valores pessoais e sociais.

A avaliação deve ser orientada pelas habilidades e competências que se pretendem desenvolver e deve haver transparência nos critérios avaliativos; assim, além de versar sobre o que foi efetivamente trabalhado, ela deve ter objetivos e critérios de correção claros para os estudantes.

Nesta coleção, ao final de cada capítulo há quatro blocos de atividades. O primeiro, denominado "Revendo conceitos, fatos e processos", permite ao estudante avaliar a aquisição de conceitos fundamentais e sua ligação com fatos e processos. O segundo – "Questões para exercitar o pensamento" – propõe questões mais amplas e abrangentes, que levam o estudante a analisar fatos e situações e a aplicar o conhecimento adquirido na solução de problemas. O terceiro – "Faça você mesmo!" – traz sugestões de experimentos, de produção de murais, de matérias jornalísticas ilustradas ou infográficos, entre outras, muitas das quais envolvendo e desenvolvendo as habilidades de trabalho em equipe. Finalmente, o quarto bloco, intitulado "A Biologia no vestibular e no Enem", apresenta questões selecionadas de vestibulares e do Enem para que o estudante, além de se autoavaliar e rever seus conhecimentos, se familiarize com o formato desses exames.

3 Utilização dos capítulos da obra

Modernas correntes pedagógicas elegem dois aspectos importantes a serem considerados no processo de ensino-aprendizagem: competências e habilidades. As primeiras referem-se a capacidades intelectuais, éticas e sociais que os estudantes devem adquirir ou implementar ao estudar os temas. As habilidades, por sua vez, são metas ou objetivos específicos a serem desenvolvidos, guiando o caminho para atingir as competências desejadas no projeto pedagógico. Neste **Suplemento para o professor** apresentamos as principais habilidades e competências utilizadas pelo Enem como referência para a avaliação.

Ao elaborar seu projeto pedagógico – o plano de ensino que determina as competências, habilidades e estratégias que serão desenvolvidas ao longo de um curso –, cada escola e cada professor têm diferentes preferências e se defrontam com diferentes realidades. Assim, a inclusão de um livro didático nesse projeto não implica o compromisso de esgotar completamente seu conteúdo, nem de seguir rigorosamente sua sequência de assuntos. Naturalmente, cada volume desta coleção divide-se em módulos e capítulos encadeados de acordo com prioridades ou pré-requisitos entre os assuntos tratados. Isso não impede, entretanto, que determinados temas sejam abordados mais resumidamente, ou mesmo postergados, a título de informação ou aprofundamento posterior.

Cabe a cada professor selecionar, entre os capítulos da obra e seus conteúdos, aqueles que são mais relevantes para o projeto pedagógico de sua escola. Em relação aos conteúdos praticados no ensino médio, os *PCN1* "reafirmam que os conteúdos e as estratégias de aprendizagem devem propiciar o ensino por competências. Nesse sentido, [...] o ensino da Biologia deve servir como meio para ampliar a compreensão sobre a realidade, recurso graças ao qual os fenômenos biológicos podem ser percebidos e interpretados, instrumento para orientar decisões e intervenções" (Brasil, 2006, p. 21).

Reconhecendo que os principais temas biológicos referem-se à compreensão da vida na Terra, das consequências dos avanços tecnológicos e da intervenção humana, os *PCN1* sintetizam, como referência, seis temas estruturadores:

> 1. interação entre os seres vivos;
> 2. qualidade de vida das populações humanas;
> 3. identidade dos seres vivos;
> 4. diversidade da vida;
> 5. transmissão da vida, ética e manipulação gênica;
> 6. origem e evolução da vida.
>
> (Brasil, 2006, p. 21)

Os *PCN1* esclarecem que:

> Não se trata simplesmente de mudar o planejamento para que a ação pedagógica se enquadre nos temas estruturadores, e sim de utilizar esses temas biológicos como instrumentos para que a aprendizagem tenha significado, de forma que o aluno seja capaz de relacionar o que é apresentado na escola com a sua vida, a sua realidade e o seu cotidiano.
>
> Um professor que utilize o livro didático em suas aulas conta com uma sequência já organizada de apresentação dos assuntos. Diante da proposta dos temas estruturadores, e considerando a sua realidade específica, as necessidades de seus alunos, as particularidades de sua escola e região, o professor pode selecionar os temas que são mais significativos e resolver como deverão ser trabalhados de modo a possibilitar situações de aprendizagem a partir das vivências dos alunos.
>
> (Brasil, 2006, p. 21-22)

Ao iniciar uma seção do capítulo, sugerimos ao professor que converse com os estudantes e avalie seus conhecimentos prévios sobre o assunto, sejam eles decorrentes de concepções baseadas no senso comum ou de conceitos aprendidos em ciclos escolares anteriores, que constituem pré-requisitos para a construção e o ancoramento de novos conhecimentos. Ao conversar sobre as habilidades a serem desenvolvidas e discutir as ideias que os estudantes têm a respeito dos temas tratados na seção, o professor poderá detectar mais facilmente os conceitos que exigirão mais discussões e explicações.

A ligação entre o que se aprende na escola e o cotidiano está presente nos capítulos sempre que possível. Os estudantes geralmente ficam mais motivados ao perceber as conexões entre os fatos próximos de sua vida e os conteúdos estudados na escola. Isso fica evidente no interesse que eles manifestam por conteúdos referentes a saúde, higiene, questões sobre reprodução, contracepção e DSTs, por exemplo. Assuntos veiculados pela imprensa podem ser utilizados como instrumentos de problematização de conteúdos. Jornais e revistas costumam ter seções especializadas em Ciências Naturais; é possível estabelecer, na sala de aula, uma rotina para acompanhar notícias de interesse científico, que podem ficar expostas em um mural, por exemplo.

Nesta obra, as relações das ciências da natureza com o cotidiano e com o exercício da cidadania são especialmente destacadas nos quadros "Ciência e cidadania". Cada um deles aborda, em um texto acompanhado de ilustrações, um assunto relacionado ao capítulo. Os parágrafos desse texto são numerados, em função das atividades propostas no Guia de leitura, que se destina sobretudo a mostrar aos estudantes as estratégias para o aprimoramento de sua capacidade leitora.

É consenso entre os professores do ensino médio que muitos estudantes têm dificuldade na leitura compreensiva dos textos escolares. Em geral, eles leem um texto rapidamente, do início ao fim, sem refletir muito sobre o que estão lendo. Ao final, na melhor das hipóteses, têm apenas uma compreensão desconexa das ideias centrais do texto. Em nossa experiência como professores, concluímos que essa é uma das principais razões de a leitura de um texto ser tão desestimulante para muitos estudantes: eles geralmente não compreendem bem o que leem e preferem aguardar por uma aula expositiva, na esperança de que o professor lhes forneça as informações necessárias.

O Guia de leitura dos quadros "Ciência e cidadania" se propõe fazer uma "varredura fina" do texto, parágrafo por parágrafo, estimulando o estudante a descobrir as ideias principais, a empregar conhecimentos prévios sobre o assunto, a emitir opiniões pessoais e a comparar informações de diversas fontes. Além disso, o Guia propõe aos estudantes a produção de textos, bem como a organização de dados em forma de tabelas, desenhos ou gráficos, ajudando-os a sistematizar conhecimentos e a apresentá-los em diferentes linguagens. Esse tipo de atividade possibilita instrumentalizar uma das propostas constantes nas *Orientações curriculares para o ensino médio*:

> Informar e informar-se, comunicar-se, expressar-se, argumentar logicamente, aceitar ou rejeitar argumentos, manifestar preferências, apontar contradições, fazer uso adequado de diferentes nomenclaturas, de diferentes códigos e de diferentes meios de comunicação, são competências gerais, recursos de todas as disciplinas. Por isso, devem desenvolver-se no aprendizado de cada uma delas.
>
> (Brasil, 2006, p. 16)

O professor pode elaborar guias semelhantes aos utilizados nos quadros "Ciência e cidadania" para orientar a leitura de outros textos, tanto do livro didático como de jornais e de revistas de divulgação científica. O mesmo pode ser feito pelos estudantes, que, dessa maneira, poderão, entre outras habilidades, aprimorar sua capacidade leitora.

A integração interdisciplinar é também uma importante estratégia de ensino. Por um lado, professores das diferentes disciplinas complementam informações, trocam ideias e desenvolvem o trabalho em equipe. Por outro, os estudantes percebem mais facilmente as relações entre diferentes fenômenos da natureza ao estudar os mesmos conceitos em diferentes disciplinas. Deve-se considerar a possibilidade de integração interdisciplinar formal ou informal e, se possível, incluir no planejamento de aula ao menos uma atividade desse tipo.

Os *PCN1* apresentam uma argumentação interessante a respeito de interdisciplinaridade:

> Quando na Biologia se fala em energia da célula, na Química, em energia da reação e, na Física, em energia da partícula, não basta que tenham a mesma grafia ou as mesmas unidades de medida. Os três temas são tratados em contextos tão distintos que o aluno não pode ser deixado solitário no esforço de ligar as "coisas diferentes" designadas pela mesma palavra. [...] Alguns conceitos gerais das ciências, como os de unidades e de escalas,

> ou de transformação e de conservação, presentes de diferentes formas na Matemática, na Biologia, na Física e na Química, seriam muito mais facilmente compreendidos e generalizados se fossem objeto de um tratamento de caráter unificado, feito de comum acordo pelos professores da área. Com certeza, são diferentes as conotações destes conceitos nas distintas disciplinas, mas uma interpretação unificada em uma tradução interdisciplinar enriqueceria a compreensão de cada uma das disciplinas.
>
> (Brasil, 2002, p. 21)

……

Por fim, manifestamos nossa expectativa de que os comentários e as sugestões deste item do **Suplemento** auxiliem o professor em suas tarefas. Em alguns casos propomos a execução de atividades complementares, idealizadas para dinamizar o curso de Biologia e para motivar os estudantes. As atividades consistem de sugestões de pesquisas, debates, simulações, teatralizações e aulas práticas, entre outras. Sempre que possível, o professor deve verificar a possibilidade de executar as atividades complementares sugeridas ao fim de cada capítulo.

Algumas atividades de laboratório podem requerer o uso de fogo, álcool e objetos potencialmente perigosos. Nesses casos, sugerimos que as atividades sejam feitas pelo professor e observadas pela turma, evitando, assim, risco à integridade física dos alunos.

4 Referências bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE (AAAS). *Benchmarks for Science Literacy*: Project 2061. Oxford: Oxford University Press, 1993. Disponível em: <http://www.project2061.org/publications/bsl/online/index.php>. Acesso em: mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Fundamental. *Parâmetros Curriculares Nacionais*: introdução aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Brasília: MEC/SEF, 1997. Disponível em: <portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/livro01.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Básica. *Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio*. Brasília: MEC/Semtec, 2000. Disponível em: <portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Básica. *PCN1 ensino médio*: orientações curriculares complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais — Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC/Semtec, 2002. Disponível em: <portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=12598:publicacoes&catid=195:seb-educacao-basica>. Acesso em: mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Básica. *Orientações curriculares para o ensino médio*: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC, 2006. v. 2. Disponível em: <portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book_volume _02_internet.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Educação. *Matriz de Referência para o Enem 2009*. Brasília: MEC/Inep, 2009. Disponível em: <portal.mec.gov.br/dmdocuments/matriz_referencia_novoenem.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

UNESCO. *Ciência na escola*: um direito de todos. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001400/140099porb.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

5 Sugestões de leitura didático-pedagógica

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

COLL, C. *Psicologia da aprendizagem no ensino médio*. Porto Alegre: Artmed, 2003.

COLL, C. et al. *O construtivismo na sala de aula*. 6. ed. São Paulo: Ática, 2002.

KRASILCHIK, M. *Prática de ensino de Biologia*. 4. ed. São Paulo: Edusp, 2008.

LUCKESI, C. C. *Avaliação da aprendizagem escolar*: estudos e proposições. 15. ed. São Paulo: Cortez, 2003.

MOREIRA, M. A. *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora da UnB, 1999.

_____. *Aprendizagem significativa*: da visão clássica à visão crítica. 2006. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/~moreira/visaoclasicavisaocritica.pdf> Acesso em: mar. 2016.

MORIN, E. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. 4. ed. São Paulo: Cortez/Unesco, 2004.

NOVAK, J. D. *Aprender, criar e utilizar o conhecimento*: mapas conceptuais como ferramentas de facilitação nas escolas e empresas. Lisboa: Plátano Universitária, 2000.

NOVAK, J. D.; GOWIN, D. B. *Aprendendo a aprender*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 1996.

PERRENOUD, P. *Dez novas competências para ensinar*. Porto Alegre: Artmed, 2000.

_____. *A prática reflexiva no ofício de professor*: profissionalização e razão pedagógicas. Porto Alegre: Artmed, 2002.

SANT'ANNA, I. M. *Por que avaliar? Como avaliar? Critérios e instrumentos*. 11. ed. Petrópolis: Vozes, 2005.

WEISSMAN, H. (Org.). *Didática das Ciências Naturais*: contribuições e reflexões. Porto Alegre: Artmed, 1998.

ZABALA, A. *A prática educativa*: como ensinar. Porto Alegre: Artmed, 1998.

_____. *Enfoque globalizador e pensamento complexo*: uma proposta para o currículo escolar. Porto Alegre: Artmed, 2002.

MÓDULO 1

Fundamentos da Genética

CAPÍTULO 1

Lei da herança genética

A importância do assunto

Neste capítulo iniciamos o estudo sistematizado da Genética.

As bases desse ramo da Biologia foram lançadas pelos trabalhos de Gregor Mendel em meados do século XIX.

O pensamento de Mendel foi inovador por integrar a análise matemática aos resultados dos cruzamentos de ervilhas, o principal material biológico usado pelo monge-cientista. Nos capítulos deste módulo e do seguinte, são apresentadas as origens da Genética e algumas aplicações do conhecimento genético analisando como os conhecimentos nessa área chegaram ao ponto atual.

No primeiro item do capítulo apresentamos resumidamente os experimentos que levaram Mendel a deduzir a primeira lei da herança; no item seguinte, mostramos alguns casos em que essa lei se aplica. No terceiro item, apresentamos variações no modelo de herança mendeliano e, no quarto item, aplicamos alguns conceitos desenvolvidos no capítulo ao estudo dos grupos sanguíneos humanos: sistema ABO e sistema Rh.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo comentamos as muitas perspectivas positivas da Genética para melhorar a qualidade da vida humana neste século XXI. Os conhecimentos na área estão cada vez mais integrados à vida das pessoas e há muitos aspectos motivadores para estimular os estudantes a se interessarem pelo tema. Vale a pena pesquisar regularmente com a classe, nos diversos meios de comunicação, notícias científicas, entre as quais boa parte refere-se à Genética.

O quadro “Amplie seus conhecimentos”, intitulado *Teoria das probabilidades aplicada à Genética*, resume os aspectos básicos da teoria matemática das probabilidades. Converse com os estudantes sobre como a visão multidisciplinar permite compreender a natureza com mais abrangência. Se achar oportuno, troque informações ou planeje algum tipo de atividade com seus colegas de Matemática. Lembre-se de que atividades interdisciplinares reforçam o aprendizado e valorizam as disciplinas escolares.

Neste e em outros capítulos que abordam conceitos de Genética, incluímos quadros chamados genericamente “Resolvendo problemas de Genética”. Neles resolvemos, passo a passo, questões e problemas de Genética para que o estudante acompanhe as etapas e os métodos utilizados em sua resolução. Neste capítulo, os problemas referem-se a heredogramas e probabilidades aplicadas à Genética. Peça aos alunos que estudem esses quadros e apliquem o mesmo formato de resolução para os problemas apresentados na seção de atividades “Questões para exercitar o pensamento”.

No capítulo incluímos também um quadro “Ciência e cidadania”, cujo título é *Sistema ABO e transfusões sanguíneas*. Nele discutimos aspectos imunológicos das transfusões de sangue de acordo com o sistema ABO. O Guia de leitura presente nesse tipo de quadro orienta o estudante sobre como analisar um texto em profundidade; estimule os alunos a responder e refletir sobre as questões do Guia. Discuta com eles a importância da doação voluntária de sangue, ressaltando que esse ato de cidadania pode salvar vidas. Se julgar oportuno, proponha algum tipo de pesquisa sobre o assunto.

Recomendamos que incentive os alunos a executar a atividade proposta na seção “Faça você mesmo!”, que propõe uma simulação da segregação dos fatores genéticos na meiose. Esse tipo de atividade ajuda a visualizar fenômenos e processos biológicos, cooperando com os passos seguintes do estudo, que exigem muita abstração.

Habilidades sugeridas

- Estar informado sobre a contribuição de Gregor Mendel à Genética e reconhecer o pioneirismo de seu raciocínio probabilístico aplicado à hereditariedade.
- Representar, por meio de esquemas ou modelos, a segregação dos cromossomos e dos alelos na meiose.
- Compreender os princípios de construção do quadrado de Punnett e dos heredogramas, aplicando-os à resolução de problemas de Genética envolvendo um par de alelos.
- Conhecer as bases genéticas dos grupos sanguíneos ABO e Rh e compreender por que determinadas transfusões de sangue são incompatíveis ou não recomendadas entre algumas pessoas, devido ao risco de problemas imunitários.

Itens principais

- Mendel e as origens da Genética
- Conceitos básicos em Genética
- Variações do modelo mendeliano de herança
- Herança de grupos sanguíneos na espécie humana

Conceitos fundamentais

- Genética
- Herança biológica
- Dominante
- Recessivo
- Lei da segregação dos fatores
- Loco gênico
- Alelos
- Homozigóticos
- Heterozigóticos
- Fenótipo
- Genótipo
- Cruzamento-teste
- Heredogramas
- Alelos letais
- Alelos múltiplos
- Dominância incompleta
- Codominância
- Penetrância
- Expressividade gênica
- Eritroblastose fetal

CAPÍTULO 2

As bases cromossômicas da herança

A importância do assunto

No capítulo continuamos a estudar os princípios que regem a herança biológica e o passo a passo de sua descoberta, empreendida por várias gerações de cientistas. Ao imaginar a existência de fatores presentes aos pares nos indivíduos e que esses fatores se separavam na formação dos gametas, Mendel estava antecipando os conceitos de diploidia e haploidia e o evento reducional que ocorre na meiose, fatos que seriam compreendidos apenas algum tempo depois.

No primeiro item do capítulo, procuramos mostrar como Mendel ampliou a compreensão sobre os princípios básicos da herança ao propor a lei da segregação independente dos fatores hereditários.

Hoje sabemos que a segregação independente é um aspecto particular da hereditariedade, ocorrendo entre genes localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos.

No segundo item, abordamos genes com segregação independente que interagem na produção de características, entre elas as heranças da cor da plumagem de periquitos, da cor de olho na espécie humana, da forma da crista de galináceos e da cor da pelagem em cães labradores.

No último item do capítulo, são estudados os genes localizados no mesmo cromossomo, que não se segregam independentemente, e os princípios do mapeamento gênico, em que se estima a distância entre os locos gênicos em um cromossomo.

O conhecimento sobre segregação independente dos genes e sobre os demais assuntos tratados permite prever genótipos e fenótipos para algumas características humanas, como tipo sanguíneo e cor dos olhos. Esse conhecimento pode ser usado também em testes de exclusão de paternidade e em seleção de plantas e de animais com as características de interesse.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo comentamos como cada cientista, ao abrir uma pequena janela na “caixa-preta” do desconhecido, contribui para que seus colegas avancem cada vez mais no conhecimento científico sobre determinado tema. É o que constatamos ao estudar os trabalhos de Mendel, seguidos pelos de Sutton e dos drosofilistas liderados por Morgan, que construíram as bases da Genética. Vale a pena chamar a atenção dos alunos para o fato de que o conhecimento é um empreendimento coletivo e que uma descoberta aparentemente sem sentido, em uma época, pode assumir muita importância em novos contextos.

No capítulo há três quadros “Resolvendo problemas de Genética” que trazem a resolução, passo a passo, de problemas propostos. O primeiro refere-se à segregação independente dos genes que controlam os grupos sanguíneos ABO e Rh; o segundo traz um problema envolvendo herança quantitativa; o terceiro, um problema de ligação gênica e mapeamento cromossômico. Recomendamos que estimule os estudantes a adotar um formato de resolução semelhante ao dos quadros para resolver os problemas propostos na seção “Questões para exercitar o pensamento”. Isso pode ajudá-los a organizar o raciocínio na resolução desse tipo de questão.

Continuando na linha de estimular a “visualização” dos fenômenos que envolvem cromossomos e genes na meiose, propomos atividades na seção “Faça você mesmo!” que visam simular a segregação independente dos genes, a permutação cromossômica e a recombinação gênica por meio de modelos de massa de modelar ou de barbante.

Habilidades sugeridas

- Conhecer os experimentos de Mendel que envolviam duas características simultaneamente e compreender a essência da segregação independente dos fatores e como ela se traduz nas proporções fenotípicas da descendência.
- Aplicar conhecimentos sobre segregação independente e probabilidades na resolução de problemas de Genética.
- Representar a segregação independente de genes localizados em cromossomos diferentes por meio de esquemas ou de modelos do processo meiótico.
- Conceituar interação gênica e compreender como ela determina a forma da crista em galináceos e a cor da pelagem em cães labradores, entre outros exemplos.
- Compreender por que genes localizados no mesmo cromossomo não se segregam independentemente e explicar esse fato por meio de esquemas e de modelos da meiose.
- Compreender por que as frequências de recombinação entre genes ligados permitem estimar sua distância relativa e elaborar mapas gênicos.
- Aplicar conhecimentos sobre ligação gênica e probabilidades para resolver problemas de Genética.

Itens principais

- A segregação independente de genes
- Interações entre genes com segregação independente
- Genes localizados no mesmo cromossomo

Conceitos fundamentais

- Lei da segregação independente
- Interação gênica
- Herança quantitativa
- Ligação gênica
- Permutação cromossômica
- Mapas gênicos
- Unidade de recombinação

CAPÍTULO 3

Herança e sexo

A importância do assunto

Neste capítulo, o estudo da Genética ganha um novo componente: o sexo. Somos homens ou mulheres porque recebemos de nossos pais uma combinação específica de cromossomos e genes, responsáveis pela determinação do sexo.

Inicialmente discutimos os diferentes tipos de sistemas cromossômicos de determinação do sexo nos seres vivos (XY, X0, ZW, Z0 e haploide/diploide) para, em seguida, abordar o estudo de genes localizados no cromossomo X humano, com destaque para dois traços que seguem a herança ligada ao cromossomo X: o daltonismo e a hemofilia.

Para complementar, estudamos o curioso fenômeno da compensação de dose em mamíferos, em que um dos cromossomos X da fêmea é inativado nas células do corpo, tornando a dose genética sexual equivalente à dos machos, em que há apenas um cromossomo X em cada célula.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo comentamos mais uma vez o papel do sexo nos seres vivos, fato ainda não totalmente explicado. Destacamos que, em nossa espécie, o momento da determinação do sexo é a fecundação, a partir da combinação cromossômica presente no zigoto.

A relação entre os genes e os cromossomos fica muito clara ao estudarmos características ligadas ao sexo. É fundamental lembrar sempre aos estudantes que os genes se localizam nos cromossomos e que, pela meiose, eles se distribuem para os gametas (ou para esporos, no caso das plantas), que originarão a geração seguinte.

Recomendamos enfatizar que a teoria cromossômica da herança realmente se consolidou com os trabalhos de Morgan sobre a herança ligada ao sexo na mosca drosófila.

Um aspecto interessante a ser destacado é como certos fatos comuns, como gatos de três cores serem sempre fêmeas, por exemplo, ganham novo significado quando sabemos que essa relação é explicada pela compensação de dose, um curioso fenômeno de “equalização” sexual entre machos e fêmeas no nível celular.

No quadro “Resolvendo problemas de Genética”, combinamos a herança autossômica e a herança ligada ao cromossomo X em um único problema. Como já sugerimos, proponha aos estudantes que utilizem um formato semelhante ao dos problemas resolvidos nesses tipos de quadros quando forem resolver atividades da seção “Questões para exercitar o pensamento”. Nessa seção, destacamos uma atividade que propõe a produção de um texto em que se aplicam conhecimentos trabalhados no capítulo – o daltonismo e sua herança – a uma questão de cidadania, no caso, a adequação de placas de trânsito para facilitar sua identificação e leitura por pessoas daltônicas, que não distinguem verde e vermelho.

Habilidades sugeridas

- Conceituar cromossomo sexual e conhecer os principais sistemas de determinação cromossômica do sexo, com destaque para o sistema XY dos mamíferos.
- Compreender e explicar os processos de determinação genética do daltonismo e da hemofilia.
- Aplicar os conhecimentos relativos à herança de genes localizados em cromossomos sexuais e à probabilidade na resolução de problemas que envolvem cruzamentos genéticos.

Itens principais

- Os cromossomos e o sexo
- Herança de genes localizados em cromossomos sexuais

Conceitos fundamentais

- Cromossomos sexuais
- Autossomos
- Sexo homogamético
- Sexo heterogamético
- Hemizigoto
- Herança ligada ao cromossomo sexual
- Daltonismo
- Hemofilia
- Cromatina sexual
- Compensação de dose

CAPÍTULO 4

Genética e biotecnologia na atualidade

A importância do assunto

Os conhecimentos sobre a natureza do DNA e da codificação genética, aprimorados nas décadas de 1950 e 1960, foram rapidamente aplicados ao desenvolvimento de tecnologias de manipulação dos genes, no que se convencionou chamar de Engenharia Genética. Os principais seres experimentais da manipulação genética foram as bactérias e os vírus. Graças à sua relativa simplicidade, eles têm ajudado os cientistas a descobrir segredos fundamentais da vida.

Atualmente, por meio da manipulação genética, os cientistas são capazes de produzir variedades de seres vivos antes inexistentes na natureza, utilizando-as na produção de medicamentos e como fonte de alimentos, entre outras utilidades.

No capítulo, abordaremos o conceito de gene para em seguida discutir algumas técnicas de sua manipulação e como os conhecimentos na área de Genética têm possibilitado desenvolver novas tecnologias, cuja aplicação às vezes provoca debates na sociedade, como é o caso dos organismos geneticamente modificados (OGMs) e da identificação de pessoas pelo DNA.

Iniciamos o estudo pelo controvertido conceito de gene e o processo pelo qual as informações genéticas podem ser “editadas” de mais de uma maneira, produzindo diferentes resultados. Em seguida, discutimos a noção de melhoramento genético, praticada há muito tempo pela humanidade e que hoje é embasada em conhecimentos científicos. No terceiro item, apresentamos as principais técnicas utilizadas em Engenharia Genética, mais apropriadamente chamada de tecnologia do DNA recombinante, uma área promissora da Biologia neste século. No quarto item do capítulo abordamos as técnicas de clonagem molecular, que têm possibilitado utilizar certas bactérias como microfábricas de substâncias genuinamente humanas. Em seguida, tratamos dos organismos transgênicos, comentando seu potencial tecnológico e seus eventuais riscos para a saúde e para o meio ambiente. Por fim, discutimos alguns aspectos do Projeto Genoma Humano. Esses assuntos são bastante atuais, envolvem posições éticas e políticas e permitem trabalhar conceitos, princípios, procedimentos, atitudes e valores.

Ao abordar os conhecimentos relativos à natureza do material hereditário e sua aplicação na sociedade, contribuímos para que a escola cumpra seu papel de transmitir o conhecimento socialmente produzido. Ao discutir aspectos morais, religiosos e culturais das questões decorrentes da aplicação de conhecimentos genéticos, os estudantes percebem que o aprendizado escolar está relacionado com a vida das pessoas e que o conhecimento científico pode auxiliar a humanidade a enfrentar os desafios para manter e, se possível, melhorar a qualidade de vida de nossa espécie em equilíbrio com os ecossistemas naturais.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura deste último capítulo de Genética, que fecha o módulo 1, chamamos a atenção para as muitas possibilidades da aplicação do conhecimento genético.

Incentive os alunos a refletir sobre a afirmação do cientista e educador Jacob Bronowski acerca da cultura científica dos cidadãos, que envolve a consciência dos poderes, das limitações e dos riscos que o conhecimento científico e suas aplicações representam. Converse sempre que possível com os alunos sobre esses temas e estimule-os a participar conscientemente dessas discussões e a acompanhar as novas descobertas científicas e os impactos da Genética na sociedade contemporânea.

Há muitas possibilidades de integrar os assuntos deste capítulo à Filosofia e à Sociologia, abordando questões éticas e morais. Uma sugestão é propor uma discussão sobre o emprego do moderno conhecimento científico do ponto de vista das diferentes disciplinas. Os resultados desse trabalho interdisciplinar poderiam ser apresentados em seminários, painéis ou debates, envolvendo toda a escola.

Incluímos um quadro “Ciência e cidadania”, intitulado *A identificação de pessoas pelo DNA*, no qual apresentamos os princípios utilizados para identificar o padrão do DNA de cada pessoa. Um assunto relativamente complexo como esse é facilitado pelo Guia de leitura, que ajuda os estudantes a percorrer os meandros do texto, extraindo dele os seus principais significados. Auxilie os alunos a compreender os princípios da técnica de eletroforese e sua importância na identificação dos tipos de DNA.

Já o quadro “Ciência e cidadania” *Mais difícil do que o imaginado* complementa as informações apresentadas no item O Projeto Genoma Humano, trazendo as expectativas e perspectivas possíveis a partir do sequenciamento genético. Estimule os alunos a responder às questões propostas no Guia de leitura, que ajudam a analisar o texto e refletir sobre ele.

Estimule os alunos a executar as atividades propostas nas seções “Questões para exercitar o pensamento” e “Faça você mesmo!”. No primeiro, há uma interessante matéria de jornal que ressalta as virtudes do DNA como forma de armazenar informações. Sobre a matéria, propusemos uma atividade interdisciplinar que explora, além dos conceitos de Biologia, os princípios da informática e a compreensão leitora do estudante.

A seção “Faça você mesmo!” simula uma técnica de identificar pessoas pelo DNA, com questões sobre um crime e um caso de paternidade duvidosa que colocam em prática o conhecimento dos alunos. O tema da identificação de pessoas pelo DNA é muito divulgado pela mídia e os estudantes costumam ter interesse em compreender seus fundamentos básicos. A atividade pode ser realizada em sala de aula, individualmente ou em grupos de dois ou três estudantes, com a supervisão do professor.

Habilidades sugeridas

- Reconhecer o gene como um segmento de DNA delimitado por sequências específicas de bases nitrogenadas: região promotora e região de término da transcrição.
- Conceituar melhoramento genético, compreendendo e exemplificando o conceito de heterose ou vigor híbrido.
- Conhecer os princípios básicos da manipulação genética e algumas de suas aplicações – clonagem molecular, identificação de pessoas, produção de transgênicos etc.
- Valorizar o conhecimento científico e reconhecer a importância dele para a formação de opinião e a participação consciente em debates sobre temas polêmicos, como aqueles que envolvem clonagem e organismos transgênicos.

Itens principais

- O controvertido conceito de gene
- Melhoramento genético
- Engenharia Genética
- Clonagem do DNA
- Misturando genes entre espécies: transgênicos
- Desvendando o genoma humano

Conceitos fundamentais

- Gene
- Região promotora do gene
- Sequência de término de transcrição
- Melhoramento genético
- Heterose
- Engenharia Genética
- Clone
- Endonucleases de restrição
- Plasmídios
- Transgênicos

Competências e habilidades do Enem relacionadas ao módulo 1

Competências

- Compreender interações entre organismos e ambiente, em particular aquelas ligadas à saúde humana, relacionando conhecimentos científicos, aspectos culturais e características individuais.
- Apropriar-se de conhecimentos da Biologia para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

Habilidades

- Reconhecer mecanismos de transmissão da vida, prevendo ou explicando a manifestação de características dos seres vivos.
- Identificar padrões em fenômenos e processos vitais dos organismos, como manutenção do equilíbrio interno, defesa, relações com o ambiente, sexualidade, entre outros.
- Compreender o papel da evolução na produção de padrões, processos biológicos ou na organização taxonômica dos seres vivos.
- Avaliar propostas de alcance individual ou coletivo, identificando aquelas que visam à preservação e à implementação da saúde individual, coletiva ou do ambiente.

Leituras complementares para o professor

Capítulo 1 – Lei da herança genética

DASILIO, K. L. A.; PAES, M. F. Genética no cotidiano: o sistema ABO na transfusão sanguínea. *Genética na Escola*, v. 4, n. 2, p. 30-35, 2009.

O artigo traz uma atividade lúdica de baixo custo e de fácil confecção, com a finalidade de auxiliar o professor a ensinar, de maneira dinâmica, os fundamentos da genética do sistema sanguíneo ABO para alunos de ensino médio.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-4-numero-2-2009.html>. Acesso em: abr. 2016.)

MAGALHÃES, J. C. M.; JOAQUIM, L. M. Um passo além na Biologia. *Ciência Hoje*, n. 264, p. 34-39, out. 2009.

Em 1909, o botânico dinamarquês Ludvig Johannsen criou o termo *gene*, que se tornou um dos conceitos mais importantes do pensamento biológico no século XX. Johannsen também cunhou os termos *fenótipo* e *genótipo*. Esse artigo celebra os 100 anos de criação desses conceitos que revolucionaram a Biologia Evolutiva.

MIYAKI, C. Y.; MORI, L.; ARIAS, M. C.; SILVEIRA, R. V. M. Mendel enrolado na dupla-hélice. *Genética na Escola*, v. 1, n. 2, p. 67-70, 2006.

O artigo traz a sugestão de uma atividade que permite que o aluno possa visualizar e entender a integração entre os conceitos da Genética mendeliana e da Genética molecular, possivelmente já conhecidos por ele, mas em contextos independentes.

Essa atividade permite, também, que o aluno aprenda por meio da utilização de mapa de conceitos, construindo relações significativas.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-1-numero-2-2006.html>. Acesso em: abr. 2016.)

NETTO, R. C. M. Dominante ou recessivo? *Genética na Escola*, v. 7, n. 2, p. 28-33, 2007.

Considerando erros conceituais comumente observados em aulas de Genética, o texto procura desfazer mitos relacionados à manifestação fenotípica de alelos dominantes e recessivos. Para tanto, faz uma reflexão a partir de exemplos de doenças animais ou da genética de plantas.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-7-numero-2-2012.html>. Acesso em: abr. 2016.)

NEVES, L. A. S. e cols. Os longínquos antecessores de Mendel II. *Genética na Escola*, v. 7, n. 2, p. 42-45, 2007.

Ainda antes de Mendel (1822-1884), outros investigadores se aventuraram pelo cruzamento de espécies. O artigo apresenta o trabalho de Thomas Fairchild (1667-1729), que obteve a primeira planta híbrida por cruzamento artificial.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-7-numero-2-2012.html>. Acesso em: abr. 2016.)

NUNES, F. M. F.; FERREIRA, K. S.; SILVA JR., W. A.; BARBIERI, M. R.; COVAS, D. T. Genética no ensino médio: uma prática que se constrói. *Genética na Escola*, v. 1, n. 1, p. 19-24, 2006.

O artigo relata uma prática pedagógica que pode contribuir para a organização dos conteúdos de Genética.

(Disponível em: <http://ctcusp.org/pdf/references2006/19.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

TEMP, D. S.; CARPILOVSKY, C. K.; GUERRA, L. Cromossomos, gene e DNA: utilização de modelo didático. *Genética na Escola*, v. 1, n. 1, p. 9-11, 2011.

O artigo oferece uma opção de modelo didático para compreensão dos conceitos relacionados a genes, cromossomos e DNA.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-1-numero-1-2006.html>. Acesso em: abr. 2016.)

Capítulo 2 – As bases cromossômicas da herança

CAMARGO, S. S.; INFANTE-MALACHIAS, M. E. A Genética humana no ensino médio: algumas propostas. *Genética na Escola*, v. 2, n. 1, p. 14-16, 2007.

O texto reflete sobre o ensino de alguns tópicos de Genética humana presentes no currículo de Biologia para o ensino médio, trazendo alguns subsídios para o trabalho do professor em sala de aula.

(Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/b703be_213a6a6514ba4157b7327c516b634d33.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

KLAUTAU-GUIMARÃES, M. N. e cols. Entendendo a variação genética. *Genética na Escola*, v. 6, n. 1, p. 56-66, 2011.

O artigo propõe um jogo de dominó que facilita a compreensão da dinâmica do material genético na divisão celular.

(Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/b703be_ea92071f25e945f5a2209e29be8f7461.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

MIYAKI, C. Y.; MORI, L.; ARIAS, M. C. Dos genes aos fenótipos. *Genética na Escola*, v. 2, n. 1, p. 10-13, 2007.

O artigo traz uma atividade que propõe trabalhar o conceito de interação gênica de forma lúdica.

(Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/b703be_e011b17e43304da389646e8520b98c8c.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

VILAS-BOAS, A.; BUCCIARELLI-RODRIGUEZ, M. Entendendo ligação gênica: uma simulação. *Genética na Escola*, v. 1, n. 1, p. 16, 2006.

O artigo traz a sugestão de uma atividade que ajuda a compreender o conceito de ligação gênica.

(Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/b703be_5da46d3951f44787b1321ff21b89cd1e.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

Capítulo 3 – Herança e sexo

CAPELLI, L. P.; SILVEIRA, R. V. M. O "X" da questão: a diversidade gerada pela segregação cromossômica independente e a cor da pelagem de gatos. *Genética na Escola*, v. 4, n. 1, p. 17-24, 2009.

O artigo apresenta uma sugestão de material didático que utiliza o mecanismo de segregação cromossômica independente e a cor da pelagem dos gatos como exemplos de fatores de diversidade fenotípica dos indivíduos de uma espécie.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-4-numero-1-2009.html>. Acesso em: abr. 2016.)

DE SOUZA, S. J. O ponto X do sexo. *Ciência Hoje*, n. 215, p. 11-12, maio 2005.

O destaque do artigo é uma análise do sequenciamento do cromossomo X humano. Esses resultados deverão ajudar na elucidação da origem das diferenças sexuais da espécie humana e servir de plataforma de estudo em diversas doenças genéticas.

FIORAVANTI, C. A flexibilidade sexual das fêmeas. *Pesquisa Fapesp*, n. 197, p. 50-53, jul. 2012.

Algumas espécies de lagartos exibem reprodução partenogenética. Pesquisas investigam uma mutação gênica que permitiria que estímulos hormonais, por exemplo, reativassem a divisão celular de óvulos não fecundados e a formação do embrião. Isso coloca em questão a função e a vantagem da reprodução sexuada.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wpcontent/uploads/2012/07/Pesquisa_197-17.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

Capítulo 4 – Genética e biotecnologia na atualidade

ESCOBAR, H. Mosquitos transgênicos poderiam combater dengue e zika em São Paulo. *O Estado de S. Paulo*, jan. 2016.

Mosquitos geneticamente modificados podem ser usados para auxiliar no controle populacional do *Aedes aegypti* e no combate às epidemias de dengue, zika e chikungunya, por transmitir à prole um gene que ocasiona a morte das larvas.

(Disponível em: <http://ciencia.estadao.com.br/blogs/herton-escobar/mosquitos-transgenicos-poderiam-combater-dengue-e-zika-tambem-em-sao-paulo/>. Acesso em: abr. 2016.)

GAGE, F. H.; MUOTRI, A. R. O que torna o cérebro singular. *Scientific American Brasil*, n. 119, p. 34-39, abr. 2012.

Genes saltadores podem estar relacionados à variação de personalidades de gêmeos idênticos ou comportamentos de pessoas com certos transtornos psiquiátricos. Esses segmentos de DNA copiados e realocados no genoma alterariam a atividade de genes, especialmente em regiões cerebrais.

GUIMARÃES, M. DNA cigano. *Revista Pesquisa Fapesp*, n. 198, p. 54-55, ago. 2012.

A partir de estudos com cana-de-açúcar, tem-se descoberto que fragmentos de DNA sem função conhecida, os transposons (ou elementos de transposição), podem mudar de lugar, representando papel importante na dinâmica do genoma.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wpcontent/uploads/2012/08/14_transposon_198.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

MARTINEZ, E. R. M.; PAIVA, L. R. S. Eletroforese de ácidos nucléicos: uma prática para o ensino de Genética. *Genética na Escola*, v. 3, n. 1, p. 43-48, 2008.

O texto apresenta a técnica de eletroforese adaptada à sala de aula, que permite a visualização de bandas de DNA extraído de organismos e a compreensão mais clara da técnica.

(Disponível em: <http://www.educacaoeciencia.net.br/site_on/images/artigo%20Gen%C3%A9tica%20na%20Escola%203.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

MONTE, A. P. Em busca do "superpeixe" brasileiro. *Ciência Hoje*, v. 47, n. 279, p. 58 , mar. 2011.

O projeto Aquabrasil foi iniciado para, entre outras ações, baratear a produção e melhorar o desempenho da aquicultura no Brasil. Para alcançar esses objetivos, as pesquisas realizam o trabalho de melhoramento genético de espécies consideradas aptas e viáveis economicamente.

NESTLER, E. J. Computadores ocultos do cérebro. *Scientific American Brasil*, n. 116, p. 67-73, jan. 2012.

Após breve explanação sobre mudanças epigenéticas, o artigo relata as descobertas de como esse mecanismo atua sobre a dependência química e a depressão.

SOUZA, R. F. Uma simulação de teste de paternidade: quem é o pai do bezerro? *Genética na Escola*, v. 6, p. 6-10, 2011.

Após breve explanação teórica sobre a técnica de PCR, o texto propõe uma atividade de investigação de paternidade de um bezerro, apresentando o problema e questões de compreensão.

(Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/b703be_02d535736b384ab79ff827bf3330502c.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

VIEIRA, C. L. Genoma humano: ainda mais complexo. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 12-13, out. 2012.

O texto apresenta um breve panorama dos resultados acerca da funcionalidade do material genético humano.

MÓDULO 2

A evolução biológica

CAPÍTULO 5

Os fundamentos da evolução biológica

A importância do assunto

O desenvolvimento do pensamento científico a partir do Renascimento europeu possibilitou o emprego da metodologia e dos pressupostos da ciência para formular teorias bem fundamentadas para a origem do Universo, da Terra e dos seres vivos. Para a ciência atual, é consenso que o Universo, constituído pelo espaço, tempo, matéria e energia, surgiu no momento do *big bang*, sem nenhuma intervenção sobrenatural, e desde então evolui continuamente. A evolução universal tem levado à formação de estrelas, galáxias e planetas, um dos quais é a Terra. Neste planeta, onde vivemos, a vida surgiu e, desde então, vem evoluindo e se diversificando.

Neste e no próximo capítulo, estudamos como a ciência biológica explica, à luz da teoria evolucionista, a origem dos seres vivos e as mudanças pelas quais eles têm passado ao longo dos bilhões de anos de existência da Terra. Conhecer o que a ciência diz a respeito de nossas origens ajuda a refletir sobre nossa história e nossa relação com o Universo, do qual fazemos parte.

No primeiro item do capítulo, estudamos a essência do pensamento evolucionista, com ênfase nas ideias e nos trabalhos de Darwin. No segundo item, apresentamos e discutimos as evidências de que a diversidade da vida na Terra resulta da interação dos fatores evolutivos. Além dos fósseis, as muitas semelhanças entre os seres vivos, principalmente nos níveis mais básicos, fortalecem a ideia de que todos eles estão ligados pela evolução. Relembre aos estudantes, por exemplo, que o fato de todos os seres vivos e os vírus apresentarem a mesma linguagem de codificação genética é uma evidência consistente, quando associada a tantas outras, de que todos os seres são aparentados entre si. No terceiro item do capítulo, apresentamos a teoria sintética moderna e os principais fatores evolutivos.

Vale a pena ressaltar que a moderna teoria evolucionista surgiu da contribuição de diversos cientistas, que reuniram e integraram novos conhecimentos da Genética às ideias de ancestralidade comum e de seleção natural de Darwin. Esse tipo de discussão é importante para mostrar aos estudantes que o empreendimento científico resulta das contribuições integradas de inúmeros cientistas, ao longo dos séculos de cultura. No último item do capítulo, tratamos da capacidade de adaptação dos seres vivos e citamos a camuflagem e o mimetismo como exemplos adaptativos. Vale lembrar que alguns autores consideram dois níveis de adaptação: do indivíduo e da população.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo apresentamos de forma resumida alguns mitos de criação. Presentes em praticamente todas as culturas, essas explicações míticas refletem o contexto histórico em que surgiram e demonstram a necessidade humana de explicar a natureza e os seres vivos. O mito de criação mais difundido entre os povos ocidentais, de tradição judaico-cristã, surgiu em antigas tribos hebraicas do Oriente Médio e aparece no livro bíblico do Gênesis. Atualmente, a maioria dos cristãos e judeus considera o mito de criação descrito na Bíblia uma explicação alegórica para a criação do Universo. Apesar disso, há correntes fundamentalistas que defendem a interpretação literal da Bíblia e rejeitam as explicações científicas para as origens do Universo e da vida. Algumas delas advogam, contrariamente às evidências científicas, que o Universo tem não mais que 10 mil anos de existência e não os 13,7 bilhões estimados pelos cientistas.

Estudantes com formação religiosa às vezes levantam questões sobre a suposta incompatibilidade entre ciência e religião no que se refere à explicação dada à origem das diferentes espécies de seres vivos, incluindo a espécie humana. É importante ressaltar que religião e ciência têm objetivos distintos: a religião busca, de maneira geral, um sentido para a existência humana, enquanto a ciência tenta explicar fatos da natureza, entre eles como surgiu nossa própria espécie, sem nenhuma pretensão moralista. É interessante promover discussões sobre esses temas, incentivando o debate livre e aberto das ideias, promovendo o respeito às diferentes opiniões e crenças. Essas discussões podem ser amplamente enriquecidas se contarem com a participação de outras disciplinas, como História, Filosofia e Sociologia.

Uma possibilidade de integração com Geografia e História surge ao comentar a viagem de cinco anos que Darwin fez a bordo do navio inglês Beagle. Mesmo sem entrar em detalhes, sugerimos explorar o mapa do mundo da época de Darwin, atentando para o nome de alguns países. Outra possibilidade interessante é refletir sobre qual era o contexto mundial na época da viagem do naturalista, avaliando o panorama político e social da Inglaterra em meados do século XIX. Leve os estudantes a refletir que os estudos e as descobertas de Darwin fizeram com que o cientista desafiasse diversos dogmas então vigentes, dos quais ele mesmo e seus familiares partilhavam.

Uma integração mais ampla entre Biologia, História e Filosofia pode ser feita por meio de trabalhos sobre as ideias evolucionistas. A disciplina de História, por exemplo, poderia contribuir com a Biologia mostrando aos estudantes o impacto da teoria da evolução biológica na sociedade inglesa da época vitoriana. A disciplina de Filosofia, por sua vez, poderia explorar questões como religiosidade, materialismo e natureza do pensamento científico. Mesmo que não seja possível a participação dos colegas de outras disciplinas em atividades conjuntas, é sempre importante trocar ideias sobre os temas que estão sendo trabalhados em sala de aula, o que resulta em integrações informais, reforçando o trabalho pedagógico de toda a equipe.

O quadro “Ciência e cidadania” do capítulo traz um exemplo recente de seleção natural: o desenvolvimento de linhagens de organismos resistentes às drogas aplicadas para combatê-los, conteúdo que pode ser complementado com o quadro “Amplie seus conhecimentos”, intitulado *Em pequena escala, a evolução pode ser observada em ação*, e o quadro “Ciência e cidadania” *Médicos identificam superbactéria inédita em paciente brasileiro*. Converse com os estudantes sobre a obrigatoriedade de receita médica para comprar antibióticos nas farmácias e drogarias, política adotada em vários países, incluindo o Brasil. Discuta com os estudantes os motivos dessa medida, tendo em vista os temas abordados no capítulo.

Outro aspecto interessante a ser comentado é a reabilitação dos experimentos sobre melanismo industrial. Há alguns anos, esses experimentos sofreram duras críticas e ficaram um tanto desacreditados por alguns cientistas, o que foi prontamente utilizado pelos criacionistas e adeptos do chamado “*design* inteligente” para atacar a teoria da evolução. Os resultados, entretanto, foram confirmados por novos experimentos e o melanismo industrial das mariposas recuperou seu *status* de exemplo clássico de evolução, observado em tempo real.

Na seção “Faça você mesmo!”, apresentamos uma atividade para simular a formação de fósseis. Embora simples, os aspectos lúdicos e os resultados dessa atividade ajudam os estudantes a perceber a importância do documentário fóssil como evidência da evolução biológica. Certifique-se de que os estudantes compreendem o processo de formação das rochas sedimentares e que dominam a ideia de que fósseis encontrados nas camadas mais profundas de um empilhamento sedimentar são mais antigos que os encontrados nas camadas superiores. Esse assunto permite a integração com Geografia, ainda que apenas informalmente. Os conhecimentos de Química, Física e Matemática também podem contribuir com a Biologia para responder às questões relacionadas ao decaimento radioativo e à aplicação disso na datação de rochas e de fósseis.

Habilidades sugeridas

- Conhecer os princípios da visão evolucionista e compreender os principais aspectos das teorias de Lamarck e de Darwin para a evolução biológica.
- Conhecer e compreender algumas das principais evidências da evolução biológica: documentário fóssil e semelhanças anatômicas, fisiológicas e bioquímicas entre os organismos.
- Caracterizar órgãos homólogos e órgãos análogos, reconhecendo os primeiros como evidências da evolução biológica e os segundos como resultado da adaptação de seres vivos a modos de vida semelhantes.
- Compreender que a teoria sintética da evolução resultou da integração dos novos conhecimentos genéticos ao darwinismo.
- Reconhecer que a mutação e a recombinação gênicas são os principais fatores responsáveis pela variabilidade dos seres vivos, sobre a qual atua a seleção natural.
- Explicar a adaptação dos seres vivos pela ação da seleção natural, usando como exemplos a camuflagem, a coloração de aviso e o mimetismo.

Itens principais

- O pensamento evolucionista
- Evidências da evolução biológica
- A teoria sintética da evolução
- Adaptação e evolução

Conceitos fundamentais

- Evolucionismo
- Lamarckismo
- Seleção natural
- Darwinismo
- Fósseis
- Órgãos homólogos
- Órgãos análogos
- Divergência evolutiva
- Convergência evolutiva
- Estruturas vestigiais
- Teoria sintética da evolução
- Variabilidade genética
- Mutações gênicas
- Recombinação gênica
- Adaptação evolutiva
- Camuflagem
- Coloração de aviso
- Mimetismo

CAPÍTULO 6

A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos

A importância do assunto

A ciência admite a teoria evolucionista moderna como a melhor explicação para a diversidade da vida na Terra. Entretanto, quando o assunto é evolução, não há unanimidade, uma vez que entram em jogo aspectos que ultrapassam o âmbito dos fatos naturais e envolvem formação religiosa, moralidade, sentimentos, ética etc. Para muitos cientistas não há conflito entre evolução e religião. O pensamento evolucionista atém-se aos fatos naturais observáveis e tenta buscar na própria natureza as explicações para a origem da vida e a diversidade das espécies de seres vivos.

No primeiro item deste capítulo, apresentamos a explicação evolucionista para a origem das diferentes espécies de seres vivos. Frise sempre a escala do tempo geológico quando se fala da formação de uma nova espécie ou de um grupo de seres vivos. É importante ressaltar que as mudanças evolutivas podem parecer repentinas, mas nem sempre o são quando se levam em conta os níveis de grandeza do tempo geológico. Essa escala, quando comparada ao nosso tempo de vida, é quase incompreensível.

No segundo item do capítulo, estudamos as explicações evolucionistas para as origens dos principais grupos de seres atuais. Permita aos estudantes que usem a imaginação para “viajar” ao passado da Terra e reconstituir os possíveis cenários em que surgiram os diferentes grupos de seres vivos.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo discutimos que os pressupostos e procedimentos científicos aplicados, por exemplo, nas pesquisas sobre o câncer também estão presentes em todos os outros campos da ciência, como nas investigações que levaram à teoria evolucionista e que continuam a dar sustentação a essa área do conhecimento. Em outras palavras, a ciência que embasa o pensamento evolucionista atual é tão confiável quanto a ciência que tem levado à produção de conhecimentos que promoveram o desenvolvimento de inúmeras tecnologias úteis à humanidade.

Lembre sempre aos estudantes que o conhecimento científico não é definitivo e pode ser modificado. Se, porventura, novas evidências dos fatos levam a comunidade científica a duvidar de pressupostos atualmente considerados válidos, as explicações vigentes são repensadas e modificadas.

Isso vem acontecendo ao longo da história da ciência; por isso, explicações científicas que resistem ao tempo e às novas evidências tornam-se cada vez mais confiáveis.

Com base em inúmeras evidências obtidas pela observação da natureza e em experimentos de laboratório, naturalistas e biólogos tentam explicar como a vida surgiu, como a evolução ocorre e qual teria sido a origem dos grandes grupos de seres vivos atuais, com milhões de espécies adaptadas aos ambientes onde vivem. Novas descobertas em diferentes campos da Biologia, advindas das recentes tecnologias de investigação do DNA, têm se constituído em contínuos desafios à teoria evolucionista. Ao serem adequadamente explicadas pelo evolucionismo, as novas descobertas passam a apoiá-lo, ampliando seu campo de abrangência; é assim que as teorias científicas se consolidam.

A investigação científica sobre o passado liga indissociavelmente nossa espécie à história da Terra e a todas as formas de vida. A teoria da evolução biológica permite prever a existência de fósseis e imaginar os antigos cenários em que surgiram os diversos grupos de seres vivos.

A historicidade é, por certo, uma das características mais marcantes de nossa espécie. A reconstituição de cenários do passado, principalmente os da época em que viviam os dinossauros, tem sido amplamente explorada no cinema, na TV e em outros meios de comunicação. A série de filmes *Parque dos dinossauros* (*Jurassic Park*), por exemplo, mostra a clonagem molecular, estudada neste livro, como a técnica usada para dar vida aos dinossauros. No primeiro filme da série, alega-se que a clonagem é possível a partir do DNA de dinossauros obtido de mosquitos hematófagos pré-históricos. Vale a pena salientar que, embora o argumento seja engenhoso, esse tipo de clonagem não é possível com base nos conhecimentos científicos atuais.

No primeiro item do capítulo, merecem destaque os conceitos de anagênese e cladogênese. Uma corrente moderna de classificação biológica assume a cladogênese como o processo básico de formação de novas espécies. Prepare-se para utilizar esses conhecimentos em outros contextos, por exemplo, quando for tratar da classificação biológica.

Embora se acredite que a maneira mais comum de formação de novas espécies seja a especiação alopátrica, em que há algum tipo de isolamento geográfico prévio entre os grupos em especiação, as espécies podem surgir, em certos casos, sem isolamento geográfico prévio, em um processo simpátrico de especiação.

Peça aos alunos que realizem as atividades da seção “Faça você mesmo!”. Uma delas consiste em construir um painel que mostra como a disposição dos continentes mudou ao longo do tempo geológico. Essa atividade fornece uma excelente oportunidade de integração com Geografia. Consulte os colegas dessa disciplina sobre a possibilidade de trabalho conjunto nesse tema.

A outra atividade consiste em criar um infográfico, semelhante aos utilizados em jornais e revistas, para ilustrar uma matéria jornalística sobre a formação recente de novas espécies. Esse tipo de atividade exercita a capacidade leitora, a criatividade e a habilidade de se expressar de diferentes maneiras.

Habilidades sugeridas

- Conceituar anagênese e cladogênese.
- Conhecer o conceito biológico de espécie, reconhecendo-a como um grupo de organismos reprodutivamente isolado de outros grupos (outras espécies).
- Explicar, em linhas gerais, o processo de formação de novas espécies e compreender a importância do isolamento reprodutivo no processo de especiação.
- Conceituar e distinguir especiação alopátrica e especiação simpátrica.
- Conhecer a escala de tempo geológico e suas divisões – eras, períodos e épocas –, compreendendo os critérios empregados nessas divisões.
- Informar-se sobre os principais grupos de organismos que surgiram e prevaleceram nas diferentes eras geológicas.

Itens principais

- O processo evolutivo e a diversificação da vida
- A origem dos grandes grupos de seres vivos

Conceitos fundamentais

- Árvore filogenética
- Anagênese
- Cladogênese
- Espécie biológica
- Especiação
- Isolamento reprodutivo
- Tempo geológico
- Irradiação adaptativa

CAPÍTULO 7

Evolução humana

A importância do assunto

Neste capítulo estudamos a origem e a evolução da espécie humana. A visão científica sobre a nossa ancestralidade tem passado por grandes transformações nos últimos anos, em virtude tanto de novas descobertas e novos métodos de análise, como de mudanças na concepção do próprio processo evolutivo.

A ciência busca as explicações mais plausíveis para os diversos fenômenos naturais; um deles, talvez o mais intrigante, é a origem de nossa espécie. Como isso ocorreu? Há quanto tempo? Quais são as evidências de nosso parentesco com outros animais? Essas são algumas das questões abordadas no capítulo. Nos itens 7.1 e 7.2, constatamos nossas grandes semelhanças com os macacos, evidências incontestáveis de nossa estreita relação de parentesco com esses animais. No item 7.3, apresentamos e comentamos as recentes ideias sobre a árvore filogenética da humanidade. Converse com os estudantes sobre as dificuldades de estudar a nossa ancestralidade com um número relativamente pequeno de evidências fósseis. Comente também como as novas descobertas, particularmente no campo da Biologia Molecular, podem ajudar os paleontologistas nessa empreitada desafiadora.

Conhecer um pouco mais sobre a nossa história evolutiva pode nos ajudar a compreender a relação que temos com os demais seres vivos e com a natureza e a refletir sobre a importância da preservação ambiental para a manutenção da espécie humana.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo discutimos uma das maiores fraudes científicas dos últimos tempos: o fóssil do homem de Piltdown, forjado para ser o "elo perdido" entre a linhagem humana e a dos grandes macacos. Ao se especular sobre o motivo de essa falsificação ter sido aceita no meio científico da época, comenta-se que os naturalistas europeus pareciam mais inclinados a aceitar a hipótese de que o berço da espécie humana teria sido a Europa, e não a África. Essa questão é interessante porque mostra que a ciência é influenciada pelo contexto histórico e social e está longe de ser infalível, que a visão não dogmática e crítica da ciência permite corrigir concepções equivocadas e colabora para a compreensão da natureza.

No quadro "Amplie seus conhecimentos", intitulado *Estudos moleculares de hominídeos fósseis*, comenta-se como técnicas científicas recentes permitem descobertas e novas interpretações acerca da história da espécie humana.

No capítulo, apresentamos também um quadro "Ciência e cidadania", cujo título é *Receita para uma humanidade desracializada*. Nele reproduzimos um texto do professor Sérgio Danilo Pena sobre a falta de fundamento científico para a existência de raças humanas e, portanto, do preconceito racial que ainda permeia parte da sociedade no Brasil e no mundo. Estimule os alunos a responder às questões propostas no Guia de leitura, que ajudam a analisar o texto e refletir sobre ele; além de explorar conceitos importantes, o texto permite demolir preconceitos de caráter racista que muitas vezes tentam se apoiar em argumentos pseudocientíficos. O assunto do quadro possibilita integrações com disciplinas como História, Filosofia, Sociologia e Geografia ao permitir a discussão de como a evolução da cultura tem sido responsável por conquistas sociais na superação de preconceitos diversos.

Na seção "Faça você mesmo!" apresentamos uma proposta desafiadora para o estudante: depois de analisar duas matérias jornalísticas sobre novas descobertas e interpretações a respeito de nossa ancestralidade, o aluno deve produzir um texto jornalístico intitulado *O adeus às árvores*. Essa atividade propicia uma oportunidade de integração com a disciplina de Língua Portuguesa. Converse com os colegas dessa disciplina sobre a possibilidade de explorar conjuntamente a comunicação e a expressão de ideias.

Habilidades sugeridas

- Conhecer as principais evidências que relacionam evolutivamente a espécie humana e seus ancestrais primatas: fósseis; semelhanças anatômicas e moleculares.
- Conhecer a moderna classificação da espécie humana entre os primatas: ordem Primates; família Hominidae; gênero *Homo*.
- Caracterizar e explicar os principais estágios pelos quais teria passado a linhagem humana: estágio pré-humano adaptado à vida arborícola; estágio de adaptação à savana arbórea (australopitecos); estágio de adaptação à savana arbustiva (gênero *Homo*); emergência da espécie humana moderna (*Homo sapiens sapiens*).
- Informar-se da relação intrínseca entre a evolução biológica da espécie humana e o desenvolvimento da cultura.

Itens principais

- Nosso parentesco evolutivo com os grandes macacos
- História evolutiva dos primatas
- A ancestralidade humana

Conceitos fundamentais

- Bipedalismo
- Primatas
- Antropoides
- *Australopithecus*
- *Homo*
- *Homo erectus*
- *Homo antecessor*
- *Homo heidelbergensis*
- *Homo neanderthalensis*
- *Homo sapiens sapiens*
- Cultura

Competências e habilidades do Enem relacionadas ao módulo 2

Competências
• Compreender interações entre organismos e ambiente, em particular aquelas ligadas à saúde humana, relacionando conhecimentos científicos, aspectos culturais e características individuais. • Apropriar-se de conhecimentos da Biologia para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.
Habilidades
• Reconhecer mecanismos de transmissão da vida, prevendo ou explicando a manifestação de características dos seres vivos. • Identificar padrões em fenômenos e processos vitais dos organismos, como manutenção do equilíbrio interno, defesa, relações com o ambiente, sexualidade, entre outros. • Compreender o papel da evolução na produção de padrões, processos biológicos, ou na organização taxonômica dos seres vivos. • Avaliar propostas de alcance individual ou coletivo, identificando aquelas que visam à preservação e à implementação da saúde individual, coletiva ou do ambiente. • Confrontar interpretações científicas com interpretações baseadas no senso comum, ao longo do tempo ou em diferentes culturas. • Interpretar modelos e experimentos para explicar fenômenos ou processos biológicos em qualquer nível de organização dos sistemas biológicos. • Associar características adaptativas dos organismos com seu modo de vida ou com seus limites de distribuição em diferentes ambientes, em especial em ambientes brasileiros.

Leituras complementares para o professor

Capítulo 5 – Os fundamentos da evolução biológica

CAPONI, G. A marcha da natureza e seus descaminhos. *Ciência Hoje*, n. 261, p. 71-73, jul. 2009.

Em 1809, 50 anos antes da publicação de *A origem das espécies*, o naturalista francês Jean-Baptiste Lamarck publicou sua *Filosofia zoológica*, uma obra em que apelava para forças puramente naturais para explicar a origem da vida e a formação das espécies. Esse artigo celebra os 200 anos da publicação dessa obra e explora alguns de seus principais aspectos.

COSTA, F. A. P. L. De frente para o inimigo. *Ciência Hoje*, v. 49, n. 292, p. 80-83, maio 2012.

O artigo trata do relato de Walter Bates (1825-1892) sobre o processo de adaptação por seleção natural com base no mimetismo. O texto reforça as diferenças entre camuflagem e mimetismo.

FURTADO, F. Guardiã corrompida. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 47, out. 2012.

O artigo explica como a mutação em proteína supressora de células cancerosas deforma sua versão normal. A perda da função forma aglomerados que impedem que a proteína combata os tumores.

LESSA, R. Sobre humanos: Darwin e a filosofia. *Ciência Hoje*, n. 258, p. 80, abr. 2009.

A teoria da evolução se transformou no modo dominante de interpretação da variedade da vida, seja ela natural ou cultural. Assim como os medievais foram todos aristotélicos, somos todos, em grande medida, darwinianos. Nesse artigo, o autor propõe examinar o legado dessa teoria sob um prisma filosófico e destaca a dimensão visionária do pensamento de Darwin.

OLEQUES, L. C. e cols. Entendendo a seleção natural. *Genética na Escola*, v. 7, n. 2, p. 78-81, 2012.

Considerando os obstáculos encontrados no processo ensino-aprendizagem dos conceitos relacionados à evolução biológica, o trabalho propõe um jogo didático de tabuleiro, destinado a alunos do ensino médio, que auxilia na compreensão e aprendizagem desse tema.

(Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/b703be_466ecce00cb149d7bcdfa2c8fc852ff4.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

ZAIA, D. A. M. e cols. Teoria científica para quê? *Scientific American Brasil*, n. 118, p. 76-79, mar. 2012.

Resultados de uma investigação mostram algumas diferenças entre a concepção de teoria científica entre alunos de graduação de diferentes áreas: biológicas, exatas e humanas, levantando o questionamento de que talvez conceitos comuns devam ser reavivados para que sejam devidamente trabalhados com alunos tanto em sala de aula quanto em laboratórios.

(Disponível em: <www2.uol.com.br/sciam/artigos/teoria_cientifica_para_que_.html>. Acesso em: abr. 2016.)

Capítulo 6 – A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos

BRADLEY, A. S. As raízes mais profundas da vida. *Scientific American Brasil*, n. 92, p. 42-47, jan. 2010.

Análises de um tipo de fonte termal, descoberta no leito marinho, sugerem novas possibilidades para a evolução da vida.

DRAGO, C. Genes reveladores. *Ciência Hoje*, v. 49, n. 289, v. p. 56-57, jan./fev. 2012.

Com a ajuda da técnica de datação molecular, pesquisadores verificaram que a diversificação genética dos mamíferos aconteceu 15 milhões de anos antes do que se pensava. Segundo eles, no período em que mamíferos e dinossauros coexistiram, o primeiro grupo era pouco diversificado em termos de formas e tamanhos, mas não geneticamente.

KINGSLEY, D. M. Átomos e caracteres. *Scientific American Brasil*, n. 81, p. 40-47, fev. 2009.

Charles Darwin descobriu que as variações dos indivíduos estão relacionadas à evolução. Cientistas modernos revelam como essa diversidade emerge de mudanças no DNA e pode resultar em seres ou até em culturas complexas.

KLEIN, A. L.; MARTINS-FERREIRA, C. Espécies: o que são e como surgem? *Genética na Escola*, v. 7, n. 2, p. 34-41, 2012.

Isolamento reprodutivo, seleção natural, seleção sexual, reforço, isolamento e hibridização são discutidos nesse texto que tem como objetivo sintetizar conceitos-chave sobre especiação.

(Disponível em: <http://www.flipsnack.com/Eveli/revista-genetica-na-escola-volume-7-numero-2-2012.html>. Acesso em: abr. 2016.)

LACERDA, L. D. e cols. Mistérios do mar profundo. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 57-59, out. 2012.

O artigo previa que o Brasil seria parceiro em projeto científico internacional de estudos sobre os oceanos. Os resultados obtidos com o projeto fornecem dados que permitem maior compreensão sobre as formas de vida passadas, ajudando no entendimento do funcionamento atual da Terra em termos de origem e evolução.

NOGUEIRA, S. Uma planta enganadora. *Revista Pesquisa Fapesp*, n. 191, p. 60-61, jan. 2012.

Análises do DNA de cicas determinaram que as espécies hoje viventes não são as mesmas presentes na época dos dinossauros e que essa evolução pode ter sido resultado de mutações aleatórias.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/01/17/uma-planta-enganadora/>. Acesso em: abr. 2016.)

YANO, C. Corredor dos pampas. *Ciência Hoje*, v. 49 n. 289, p. 54-55, jan./fev. 2012.

O texto apresenta uma das espécies mais primitivas de dinossauro, encontrada no Rio Grande do Sul. O local da descoberta e detalhes das características observadas permitiram aos pesquisadores determinar a idade do fóssil e seu modo de vida, bem como indícios de como funcionava seu metabolismo.

ZORZETTO, S. A vida protegida por armaduras. *Revista Pesquisa Fapesp*, n. 199, p. 56-59, set. 2012.

O artigo relata que foram encontrados, ao norte do Paraguai, fósseis do que foram, provavelmente, os primeiros seres vivos com esqueleto no planeta.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/09/14/a-vida-protegida-por-armaduras/>. Acesso em: abr. 2016.)

Capítulo 7 – Evolução humana

LEONARD, W. R. Alimentos e evolução humana. *Scientific American Brasil*.

O texto sugere que mudança alimentar foi a força básica para a sofisticação física e social dos seres humanos. Nesse contexto, o bipedalismo pode ser visto como uma das primeiras estratégias na evolução nutricional humana.

(Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/alimentos_e_evolucao_humana.html>. Acesso em: abr. 2016.)

RUMJNEK, F. Corro, logo penso. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 19, out. 2012.

O texto aponta as ideias principais de um artigo que relaciona a evolução humana com atividades físicas e com o possível aumento do tamanho e da complexidade do cérebro humano.

RUSSO, C. A. M.; VOLOCH, C. M. Nosso lugar na diversidade biológica. *Ciência Hoje*, n. 261, p. 44-49, jul. 2009.

Se a evolução continua ocorrendo, poderia surgir na Terra outra espécie humana? Para que isso ocorra, segundo os autores do artigo, seriam necessárias condições especiais.

SALZANO, F. M. Estamos mudando? *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 20-25, out. 2012.

O artigo traça um paralelo entre Biologia, cultura e evolução. A partir de exemplos que mostram que algumas alterações genéticas aparentemente estão relacionadas a comportamentos socioculturais, o autor instiga a pensar que estamos convergindo para uma possível uniformização.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/2012/297/estamos-mudando>. Acesso em: abr. 2016.)

SAPOLSKY, R. M. Super-humanidade. *Scientific American Brasil*, n. 125, p. 30-33, out. 2012.

Entre as características que diferenciam nossa espécie de outros animais está a superação de limites evolutivos: temos a necessidade de nos tornar mais rápidos e mais inteligentes, por exemplo. Isso resulta num descompasso entre o ambiente ancestral e o atual e a ciência talvez seja a ferramenta para atingirmos objetivos e expandirmos nossas fronteiras.

WARD, P. Que futuro espera pelo *Homo sapiens*? *Scientific American Brasil*, n. 81, p. 56-61, fev. 2009.

Contrariamente à crença popular, os seres humanos continuam a evoluir. Nosso corpo e cérebro não são iguais aos de nossos ancestrais nem serão como os de nossos descendentes.

WONG, K. O crepúsculo do homem de Neandertal. *Scientific American Brasil*, n. 88, p. 26-31, set. 2009.

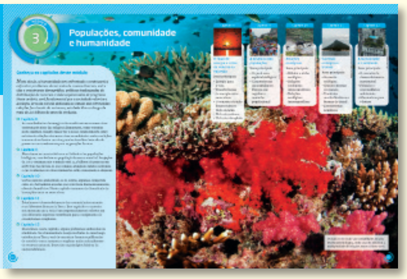
Paleoantropólogos sabem mais a respeito do homem de Neandertal que sobre qualquer outro grupo humano extinto. Entretanto, o desaparecimento desses hominídeos ainda é um mistério intrigante.

______. Os *hobbits* da Indonésia, ainda mais estranhos. *Scientific American Brasil*, n. 91, p. 48-55, dez. 2009.

Análises adicionais ao trabalho *O crepúsculo do homem de Neandertal*, do mesmo autor, sugerem que é necessário rever os princípios básicos da evolução humana.

MÓDULO 3

Fundamentos da Ecologia



3 Populações, comunidade e humanidade

CAPÍTULO 8

O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza

A importância do assunto

Tomar consciência de que nossa vida depende do Sol contribui para a visão mais integrada da natureza.

No capítulo discutimos a maneira pela qual a energia da luz solar é captada por seres fotossintetizantes e transferida para o sistema vivo quando organismos se alimentam uns dos outros. O estudo das transferências de energia tem revelado detalhes essenciais sobre a teia da vida na Terra. Quanto maior nosso conhecimento da rede de relações entre os seres vivos e o ambiente, mais condições temos de preservar os ambientes terrestres, um dos grandes desafios do século XXI.

Um dos objetivos do capítulo é esclarecer por que a energia flui unidirecionalmente na natureza viva, dissipando-se pouco a pouco na forma de calor; isso é mostrado nas representações gráficas denominadas pirâmides ecológicas.

Outros aspectos importantes tratados no capítulo são os ciclos biogeoquímicos de alguns elementos fundamentais à vida. Diferentemente do fluxo unidirecional da energia, que se dissipa ao longo dos níveis tróficos, os elementos químicos são continuamente reciclados na natureza. No capítulo, enfatize as diferenças entre o comportamento da energia e o da matéria nos ecossistemas.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo falamos sobre a importância da luz em nossa vida; indiretamente, vivemos graças à energia luminosa do Sol. De tempos em tempos, reaparecem pessoas que afirmam ser capazes de viver diretamente da energia solar, sem ingerir nenhum alimento. Recomendamos discutir com os estudantes e explicar por que isso não é possível do ponto de vista da ciência.

O conceito de energia, suas formas de manifestação e sua interconversão oferecem excelentes oportunidades de integração com as disciplinas de Física e Química. Pode ser bem proveitoso trocar ideias a esse respeito com os colegas dessas disciplinas; como sempre, as integrações interdisciplinares enriquecem o trabalho de todos os envolvidos.

Como a Ecologia hoje faz parte de muitos currículos do ensino fundamental, é possível que os estudantes já dominem os conceitos de organismo autotrófico e organismo heterotrófico, bem como as relações entre fotossíntese e respiração aeróbica. Vale a pena avaliar previamente o que os estudantes sabem desses assuntos; eles são fundamentais para entender as transferências de energia no mundo vivo.

A importância dos assuntos tratados no capítulo justifica a presença de dois quadros “Ciência e cidadania”. O primeiro, intitulado *Água, um recurso cada vez mais precioso*, alerta sobre a possível escassez de água potável no futuro e apresenta uma série de ações destinadas a racionalizar o consumo desse recurso em nossa casa, um ato de cidadania. No segundo, cujo título é *Adubação verde, leguminosas e rizóbios*, referente ao ciclo natural do nitrogênio, comenta-se sobre a atualidade de uma técnica milenar, a adubação verde, e a importância ecológica de um microrganismo – o rizóbio –, que se hospeda nas células das plantas leguminosas. Um dos objetivos desse quadro é mostrar que o conhecimento científico pode levar a descobertas como a relação cooperativa entre plantas e bactérias, que traz benefícios para tantos seres vivos, incluindo nossa espécie.

Ao abordar o ciclo do carbono, sugerimos um trabalho complementar sobre a formação de combustíveis fósseis, de onde vem a energia que eles armazenam e de que forma eles estão integrados com esse ciclo. Se for o caso, é possível aprofundar a questão e incentivar a pesquisa e o debate sobre os combustíveis fósseis.

Habilidades sugeridas

- Conhecer os fundamentos da Ecologia e justificar a importância dos estudos ecológicos para o bem-estar atual e futuro da humanidade.
- Identificar os integrantes dos diversos níveis tróficos de um ecossistema: produtores, consumidores e decompositores.
- Compreender as relações de transferência de energia nas teias alimentares.
- Reconhecer e explicar o comportamento cíclico de alguns elementos químicos que constituem as substâncias orgânicas.
- Representar, por meio de esquemas e desenhos, as etapas fundamentais dos ciclos biogeoquímicos da água, do carbono e do nitrogênio.
- Aplicar o conhecimento sobre os ciclos biogeoquímicos para interpretar eventuais alterações nos ciclos naturais, prever tendências e adotar soluções de preservação.

Itens principais

- Energia para a vida
- Transferências de energia entre seres vivos
- O conceito de ciclo biogeoquímico
- Ciclo da água
- Ciclo do carbono
- Ciclo do nitrogênio

Conceitos fundamentais

- Biomassa
- Teia alimentar
- Cadeias alimentares
- Produtores
- Consumidores
- Decompositores
- Pirâmide ecológica
- Produtividade
- Ciclo biogeoquímico
- Ciclo da água
- Ciclo do carbono
- Ciclo do nitrogênio
- Fixação do nitrogênio
- Nitrificação
- Desnitrificação

CAPÍTULO 9

A dinâmica das populações

A importância do assunto

População biológica é uma importante unidade ecológica, como será visto no capítulo. O estudo de certas características de uma população ao longo do tempo informa se ela está em expansão, em declínio ou estável, o que permite estabelecer correlações com fatores como disponibilidade de alimento, clima etc.

Ainda há muita divergência quando o assunto é o crescimento da população humana: alguns acham que se trata de um problema secundário, uma vez que a miséria e a fome no mundo estão mais relacionadas com as más políticas de distribuição de renda do que com a superpopulação.

Entretanto, é inegável que muitos problemas da humanidade se agravam quando o ambiente natural é degradado, e isso decorre diretamente da quantidade de pessoas que o exploram. É importante discutir a variedade de pontos de vista sobre esse tema cada vez mais relevante para o futuro da humanidade.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

A questão populacional humana é um destaque dos cursos de Geografia, de modo que vale a pena combinar alguma atividade integrada com os professores dessa disciplina; a nosso ver, essa interdisciplinaridade deveria fazer parte do planejamento curricular.

O quadro “Amplie seus conhecimentos” aborda o experimento clássico do cientista russo Georgyi F. Gause sobre populações. Uma sugestão é pedir aos estudantes que, após a leitura do quadro, escrevam um pequeno texto comentando seu ponto de vista sobre a seguinte questão: os resultados com populações de besouros podem ser estendidos a outras espécies?

O quadro “Ciência e cidadania” do capítulo, intitulado *A população humana,* trata de vários aspectos demográficos, incluindo a questão da explosão populacional. O texto e as questões propostas no Guia de leitura possibilitam que os estudantes obtenham informações importantes sobre o tema. Após a leitura do quadro, sugira a eles que respondam às questões e sugestões do Guia por escrito.

Convém reservar algum tempo para discutir as respostas em classe, de modo que a atividade seja motivadora e possa auxiliar na formação da cidadania.

Habilidades sugeridas

- Conhecer e conceituar algumas características das populações – densidade demográfica, taxa de crescimento populacional, taxa de natalidade e taxa de mortalidade – e aplicar esses conhecimentos na interpretação de curvas de crescimento populacional.
- Conhecer os fatores que regulam o tamanho das populações biológicas.
- Discutir a tendência de crescimento das populações humanas.
- Compreender os riscos decorrentes da explosão demográfica, discutindo e formando opinião sobre controle de natalidade, planejamento familiar e sociedade sustentável.

Itens principais

- O que é uma espécie biológica?
- Características das populações
- Fatores que regulam o tamanho populacional

Conceitos fundamentais

- Espécie biológica
- População biológica
- Densidade populacional
- Taxa de crescimento populacional
- Taxa de natalidade
- Taxa de mortalidade
- Índice de fertilidade
- Taxa de crescimento intrínseco
- Resistência do meio
- Capacidade de suporte

CAPÍTULO 10

Relações ecológicas

A importância do assunto

As comunidades de seres vivos são constituídas por populações de diferentes espécies, que se relacionam de diversas maneiras entre si e com o ambiente. Certas espécies alimentam-se de outras e algumas competem entre si; há também as que convivem de forma harmoniosa, trocando benefícios.

A vida e a evolução das espécies biológicas, inclusive da nossa, dependem precisamente da variedade dessas relações estabelecidas passo a passo ao longo do processo evolutivo.

No capítulo tratamos dos variados tipos de relação entre os seres vivos. Conhecer as relações que as populações de seres vivos mantêm entre si e com o ambiente é dar um passo importante para preservá-las, em benefício de toda a humanidade.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

Na abertura do capítulo aludimos a estudos que mostram a importância dos grandes predadores nos sistemas ecológicos. Como eles estão no topo da cadeia alimentar, seria natural pensar que a redução de suas populações causasse pouco efeito sobre os ecossistemas. Entretanto, estudos comprovam o que já se suspeitava: a trama da vida é mais complexa do que parece e precisamos estudá-la melhor para prevenir intervenções desastrosas da humanidade nos ecossistemas naturais.

O capítulo apresenta e classifica diferentes tipos de relação entre os seres vivos. Séries de televisão, documentários, fotografias e outras facilidades tecnológicas podem eventualmente ajudar o professor a ilustrar algumas das relações ecológicas tratadas no capítulo. Convém lembrar que, mais importante do que classificar e exemplificar essas relações, é entendê-las sempre em seu contexto, que é a teia da vida no planeta.

O quadro “Amplie seus conhecimentos”, intitulado *Um exemplo do papel da predação no equilíbrio ambiental*, expõe um caso clássico da importância dos predadores na manutenção do equilíbrio ambiental. Como se trata de um texto curto, uma sugestão é pedir aos alunos que o leiam antes da aula em que serão apresentadas as relações ecológicas.

Habilidades sugeridas

- Compreender, distinguir e relacionar os conceitos de hábitat e de nicho ecológico.
- Conhecer e compreender os principais tipos de relações ecológicas: competição intraespecífica; competição interespecífica; sociedade, colônia, herbivoria; predação; parasitismo; mutualismo; comensalismo; inquilinismo.
- Deduzir, a partir dos múltiplos exemplos de relações entre seres vivos, que a vida na Terra é um empreendimento coletivo, resultante de uma trama complexa e dinamicamente equilibrada de relações ecológicas.

Itens principais

- Hábitat e nicho ecológico
- Relações ecológicas intraespecíficas
- Relações ecológicas interespecíficas

Conceitos fundamentais

- Hábitat
- Nicho ecológico
- Princípio da exclusão competitiva
- Relações ecológicas
- Competição intraespecífica
- Cooperação intraespecífica
- Colônias
- Sociedades
- Competição interespecífica
- Herbivoria
- Predação
- Parasitismo
- Mutualismo facultativo
- Mutualismo obrigatório
- Comensalismo
- Inquilinismo

CAPÍTULO 11

Sucessão ecológica e biomas

A importância do assunto

No primeiro item do capítulo estudamos a sucessão ecológica, processo pelo qual comunidades biológicas de uma região se sucedem até a formação de uma comunidade clímax, na qual a teia de relações entre as diferentes espécies contribui para a estabilidade do sistema ecológico.

Quanto melhor compreendermos a trama de relações entre as espécies na comunidade, maiores chances teremos de conviver harmoniosamente com elas.

O estudo da sucessão ecológica abre caminho para que os estudantes conheçam os diferentes tipos de comunidades clímax de diversas regiões do planeta: savanas, florestas, desertos etc. A valorização e a preservação desses ambientes naturais estão entre os maiores desafios da humanidade. O reconhecimento das feições características de cada ambiente não é apenas cultura, é um exercício de cidadania.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

A abertura do capítulo traz uma boa notícia, algo normalmente inusitado quando o assunto é meio ambiente: a capacidade de recuperação dos ecossistemas naturais, como ocorreu em uma ilha da região de Sumatra, na Indonésia. A intenção é mostrar que ainda há tempo para corrigir intervenções humanas desastrosas na natureza e preservar e conservar o que temos.

O estudo dos biomas do mundo e do Brasil propicia a integração com a disciplina de Geografia, que geralmente trata do tema sob um ponto de vista diferente do da Biologia. Desse modo, o assunto pode ser enriquecido com aspectos sociológicos e econômicos, ampliando os horizontes culturais dos estudantes.

Hoje há um movimento positivo de conscientização das pessoas para a preservação dos ambientes naturais. Estudos sugerem que somente dessa maneira a humanidade poderá evitar catástrofes advindas da destruição dos grandes ecossistemas. Vale a pena explorar a importância da preservação dos biomas brasileiros para a manutenção da qualidade de vida dos habitantes das diferentes regiões do país.

A extensão do conteúdo do capítulo poderá demandar estratégias para economizar tempo em classe. Uma sugestão é considerar a possibilidade de os estudantes prepararem os assuntos fora do horário de aula, de preferência em grupo, reservando o tempo em classe para seminários e painéis apresentados por eles e para esclarecer dúvidas.

Convém valorizar e destacar os tipos de bioma mais próximos da escola e organizar visitas guiadas com os alunos.

Habilidades sugeridas

- Conceituar sucessão ecológica e conhecer as principais mudanças observadas em relação à biomassa, à estabilidade e à biodiversidade das comunidades ao longo da sucessão.
- Conceituar microclima, homeostase e comunidade clímax; conhecer alguns dos fatores que determinam as características de um ecossistema de determinada região.
- Conceituar bioma; caracterizar e localizar geograficamente os principais biomas do mundo: tundra; taiga; floresta temperada; floresta tropical; savana; pradaria; deserto.
- Caracterizar e localizar geograficamente os principais biomas brasileiros: floresta amazônica; floresta pluvial costeira; floresta de araucárias; cerrado; pampa; caatinga; floresta de cocais; manguezal.
- Aplicar conhecimentos referentes aos biomas do mundo e do Brasil na reflexão sobre temas polêmicos da atualidade, como a preservação dos ambientes naturais, o desenvolvimento sustentável e a exploração racional de recursos, entre outros.

Itens principais

- Sucessão ecológica
- Grandes biomas do mundo
- Domínios morfoclimáticos e biomas do Brasil
- Ecossistemas aquáticos

Conceitos fundamentais

- Sucessão ecológica
- Espécie pioneira
- Comunidade clímax
- Bioma
- Tundra
- Taiga
- Floresta temperada
- Floresta tropical
- Savana
- Pradaria
- Deserto
- Domínio morfoclimático
- Floresta amazônica
- Floresta pluvial costeira
- Floresta de araucárias
- Cerrado
- Pampa
- Caatinga
- Floresta de cocais
- Manguezal
- Pantanal Mato-Grossense
- Plâncton
- Bentos
- Nécton

CAPÍTULO 12

A humanidade e o ambiente

A importância do assunto

Nas últimas décadas, cada vez mais pessoas têm percebido a necessidade de usar os recursos naturais de forma racional e consciente, de maneira a garantir um mundo habitável para as próximas gerações.

No capítulo tratamos de alguns aspectos problemáticos da relação entre seres humanos e natureza. Aprendendo mais sobre esses temas, damos um passo fundamental para nosso futuro. Ao refletir sobre proteção e conservação ambiental, podemos ajudar a construir uma sociedade mais equilibrada.

Nesse contexto, a Ecologia torna-se imprescindível, uma vez que, para desenvolver estratégias globais de utilização dos recursos naturais, é essencial conhecer a composição e o funcionamento dos ecossistemas. Cuidar do planeta é, hoje, uma responsabilidade de todos os cidadãos do mundo.

Sugestões didáticas e comentários sobre o capítulo

A abertura do capítulo introduz uma lista de problemas e desafios ambientais; além disso, traz um conceito relativamente novo, que tem adquirido relevância nas sociedades contemporâneas: desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade. O princípio é simples: temos de deixar para nossos filhos e netos um mundo que não seja pior do que o herdado de nossos pais. Tudo indica, porém, que a humanidade ainda não sabe como fazer isso. A discussão de temas relativos à sustentabilidade faz parte da cidadania em prol das gerações futuras.

Os assuntos abordados no capítulo poderiam ser trabalhados com as disciplinas de Física, Química, Geografia e História, apenas para mencionar aquelas com as quais a possibilidade de integração é mais direta.

As disciplinas de Física e Química poderiam participar do desenvolvimento de temas como efeito estufa, poluição atmosférica e camada de ozônio. No quadro “Ciência e cidadania”, intitulado *O escudo atmosférico de gás ozônio,* é abordada a importância do cinturão de ozônio que protege a superfície da Terra da radiação ultravioleta prejudicial aos seres vivos. Como proposto em capítulos anteriores, os alunos poderão ler o quadro e responder por escrito às questões do Guia de leitura. Se houver tempo e interesse, será proveitoso realizar um debate em classe tendo por base as respostas dos estudantes.

As discussões sobre sustentabilidade ficariam a cargo de Geografia e História. A adoção de uma perspectiva interdisciplinar facilitará o estudo de questões tão importantes como essas. Uma forma de introduzir essa multidisciplinaridade é trabalhar com o tema do “Amplie seus conhecimentos”, intitulado *Descarte de dejetos humanos*, que traz o histórico da preocupação das civilizações com relação à poluição e acúmulo de dejetos.

Um tema que favorece a participação ativa dos estudantes é o problema do lixo urbano e sua reciclagem; em muitas grandes cidades já existe a coleta seletiva do lixo, que facilita a reciclagem de metais, plásticos, papéis etc. O *site* da prefeitura da cidade onde se localiza a escola pode fornecer dados sobre a destinação do lixo. Estimule os estudantes a participar das discussões sobre a importância da separação do lixo nas residências e de sua reciclagem. Nesse momento, seria interessante também mencionar que, além da separação e reciclagem do lixo, é importante rever hábitos e reduzir o consumo para, assim, diminuir a quantidade de lixo produzido. Mencionar alguns números pode ajudar os alunos a imaginar a quantidade de lixo produzido em uma cidade como São Paulo: uma pessoa produz, em média, cerca de 1 kg de lixo por dia; a quantidade de lixo gerado corresponde a mais de 3.500 caminhões carregados diariamente. Proponha que os alunos pesquisem sobre o destino que é dado aos materiais descartados. Esse assunto permite ainda uma conversa sobre o impacto que o desenvolvimento da sociedade teve no ambiente. Proponha algumas perguntas: 1. Como a Revolução Industrial aumentou a produção de lixo pela população? 2. O lixo gera um fluido característico em sua decomposição, o chorume, que pode conter diversos microrganismos, além de elevado teor de matéria orgânica. Quando o lixo é descartado de maneira inapropriada, como em um terreno baldio ou em um lixão, que problemas o chorume pode causar? 3. Pense em uma compra normal que você faz no mercado. Quanto dela você aproveita? Quanto não é utilizado e vira lixo?

O quadro “Amplie seus conhecimentos”, intitulado *Alternativas energéticas*, apresenta um panorama da matriz energética atual em nações desenvolvidas e possíveis alternativas mais “limpas”, em um mundo bastante afetado pela poluição e com os combustíveis fósseis em fase de esgotamento. Sugira aos estudantes que leiam o quadro e escrevam um texto curto expressando sua opinião sobre os assuntos tratados.

Outro tema bastante interessante de ser trabalhado com os estudantes é abordado no quadro “Ciência e cidadania”, intitulado *Sistema de agroflorestas é mais vantajoso na produção de orgânicos*, em que é possível abordar a conservação de recursos naturais (produção de alimentos mantendo áreas florestais) e a redução de impactos ambientais (ausência de inseticidas e agrotóxicos).

Habilidades sugeridas

- Conhecer os princípios básicos da sustentabilidade e compreender sua importância para a preservação dos ambientes naturais.
- Conhecer as principais formas de poluição – do ar, da água e do solo – e discutir maneiras de minimizar seus efeitos no ambiente natural.
- Estar informado de que interferências humanas em comunidades naturais – desmatamentos, introdução e extinção de espécies etc. – podem causar desequilíbrios ecológicos.

Itens principais

- O conceito de desenvolvimento sustentável
- Poluição e desequilíbrios ambientais
- Alternativas para o futuro

Conceitos fundamentais

- Desenvolvimento sustentável
- Poluição
- Chuvas ácidas
- Inversão térmica
- Efeito estufa
- Eutrofização
- Maré vermelha
- Reciclagem do lixo
- Desmatamento
- Extinção de espécies

Competências e habilidades do Enem relacionadas ao módulo 3

Competências

- Compreender interações entre organismos e ambiente, em particular aquelas ligadas à saúde humana, relacionando conhecimentos científicos, aspectos culturais e características individuais.
- Entender métodos e procedimentos próprios das Ciências Naturais e aplicá-los em diferentes contextos.
- Associar intervenções que resultam em degradação ou conservação ambiental a processos produtivos e sociais, bem como a instrumentos ou ações científico-tecnológicos.
- Apropriar-se de conhecimentos da Biologia para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

Habilidades

- Compreender o papel da evolução na produção de padrões, processos biológicos, ou na organização taxonômica dos seres vivos.
- Identificar etapas em processos de obtenção, transformação, utilização ou reciclagem de recursos naturais, energéticos ou matérias-primas, considerando os processos biológicos, químicos ou físicos neles envolvidos.
- Avaliar impactos em ambientes naturais decorrentes de atividades sociais ou econômicas, considerando interesses conflitantes.
- Avaliar propostas de intervenção no ambiente, considerando a qualidade da vida humana ou medidas de conservação, recuperação ou utilização sustentável da biodiversidade.

Leituras complementares para o professor

Capítulo 8 – O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza

CHRISTANTE, L. A culpa não é do capim. *Revista Unesp Ciência*, n. 28, p. 42-43, mar. 2012.

A baixa produtividade da pecuária leiteira no semiárido cearense poderia ser explicada pela escassa alimentação do gado holandês, não pela baixa qualidade do pasto. Para se proteger das altas temperaturas locais, os animais preferem ficar sem comer, à sombra, do que buscar alimento ao sol.

(Disponível em: <www.unesp.br/aci_ses/revista_unespciencia/acervo/28/quem-diria>. Acesso em: abr. 2016.)

CLEMENT, C. R. Biodiversidade: um bem a ser valorizado. *Ciência Hoje*, n. 246, p. 60-62, mar. 2008.

A biodiversidade é um produto estratégico, matéria-prima para a bioprospecção e para o desenvolvimento biotecnológico, mas não contribui para o PIB brasileiro de acordo com sua magnitude. O artigo discute o valor estratégico potencial da biodiversidade brasileira e a necessidade de maiores investimentos em pesquisa científica e em inovação tecnológica para que a biodiversidade se converta em valor econômico.

MARQUES, F. Do genoma à usina. *Revista Pesquisa Fapesp*, n. 1, p. 140-147, maio 2012. (Edição especial 50 anos)

Pesquisas multidisciplinares que fazem parte do programa Bioen buscam ampliar ainda mais a produtividade do etanol a partir do avanço da tecnologia de geração de energia de biomassa.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2012/08/140-147_bioen.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

PIRES, A. P. F.; SILVA, A. C. F.; FARJALLA, V. F. Algo além do número de espécies. *Ciência Hoje*, n. 245, p. 62-64, fev. 2008.

O artigo discute as causas e as consequências da biodiversidade do planeta e sua importância para o equilíbrio dos ecossistemas. Cada espécie, afirmam os autores, tem papel de manutenção nos processos ecossistêmicos, e a presença de um maior número de espécies potencializaria a disputa pelos recursos disponíveis em um ambiente, um motivo a mais para fortalecer as políticas de conservação no Brasil.

VIEIRA, C. L.; FURTADO, F. Amigas invisíveis. *Ciência Hoje*, n. 246, p. 10-13, mar. 2008.

O artigo apresenta a entrevista de *Ciência Hoje* com o ecólogo inglês Andrew Whiteley, especialista em bactérias do solo. Ele fala sobre como esses microrganismos são capazes de sobreviver nos mais diversos ambientes e discute sua importância para a vida na Terra. O pesquisador trabalhou em um censo sobre a densidade e a distribuição geográfica de micróbios de solo.

Capítulo 9 – A dinâmica das populações

BERQUÓ, E.; CAVENAGHI, S. A evolução da fecundidade no Brasil. *Ciência Hoje*, n. 219, p. 28-33, set. 2005.

O artigo discute a queda do número de filhos por mulher e o rejuvenescimento da fecundidade no Brasil.

COHEN, J. A maturidade da população. *Scientific American Brasil*, n. 41, p. 40-47, out. 2005.

Quando o número de pessoas no planeta chegar a 9 bilhões, viveremos mudanças nunca vistas no equilíbrio entre jovens e idosos, ricos e pobres, cidades e fazendas.

JONER, F.; PILLAR, V. P. Redundância funcional: o excesso indispensável. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 295, p. 74-76, ago. 2012.

Estudos têm demonstrado que a perda de espécies funcionalmente semelhantes reduz a estabilidade dos ecossistemas.

MUSSER, G. O clímax da humanidade. *Scientific American Brasil* n. 41, p. 36-39, out. 2005.

Os próximos 50 anos serão decisivos para determinar se a espécie humana vai garantir o melhor futuro possível para si ou entrar em colapso.

Capítulo 10 – Relações ecológicas

CHAMOVITZ, D. O olfato das plantas. *Scientific American Brasil*, n. 121, p. 62-65, jun. 2012.

Investigações revelam a maneira como as plantas reagem a "odores". Os compostos químicos voláteis liberados por alguns vegetais e detectados por outros pode informar às plantas sobre ataques a vegetais vizinhos ou ajudá-las na detecção de uma hospedeira saudável.

(Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/o_olfato_das_plantas.html>. Acesso em: abr. 2016.)

MADREN, C. O clube dos comensais exigentes. *Scientific American Brasil*, n. 120, p. 12, maio 2012.

Apesar de bem distribuídas geograficamente, as belas orquídeas são bastante exigentes quanto ao ambiente onde se desenvolverão. Tão seletivas quanto elas são os fungos de que necessitam para obter nutrientes e crescer.

(Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/noticias/o_clube_dos_comensais_exigentes.html>. Acesso em: abr. 2016.)

MOFFETT, M. W. Formigas e a arte da guerra. *Scientific American Brasil*, n. 116, p. 74-79, jan. 2012.

Algumas táticas de combate usadas por formigas que vivem em colônia podem ser semelhantes às dos humanos. A escolha da estratégia varia de acordo com o que está em jogo e a capacidade bélica desses insetos é reforçada pela fidelidade total à colônia.

NOGUEIRA, P. Flores para morcegos. *Revista Unesp Ciência*, n. 27, p. 34-39, fev. 2012.

Pesquisadores investigam a relação entre a fragmentação do Cerrado no estado de São Paulo e interações ecológicas entre uma espécie de *Bauhinia* e morcegos. Os morcegos atuam como principais agentes polinizadores das flores de *Bauhinia*, e sua ação está ligada ao sucesso reprodutivo dessa planta.

(Disponível em: <www.unesp.br/aci_ses/revista_unespciencia/acervo/27/estudo-de-campo>. Acesso em: abr. 2016.)

PEREIRA, R. A. S. Lutas fatais dentro do figo. *Ciência Hoje*, n. 215, p. 66-69, maio 2005.

Quem observa uma frondosa figueira não imagina que, na copa da árvore, milhares de insetos machos de pequenas vespas morrem em disputas agressivas por acasalamento. Essas vespas desenvolvem-se e reproduzem-se exclusivamente no interior dos figos. Essa curiosa forma de competição é o tema do artigo.

PREZOTO, F.; CORTES, S. A. O.; MELO, A. C. Vespas: de vilãs a parceiras. *Ciência Hoje*, n. 253, p. 70-73, out. 2008.

As vespas, insetos pertencentes ao mesmo grupo das formigas e abelhas, são mais conhecidas por suas dolorosas ferroadas do que por sua ecologia. Na verdade, elas são inimigas naturais de vários outros insetos que se alimentam de plantas. Uma colônia de vespas do gênero *Polybia* com 40 mil indivíduos, por exemplo, pode capturar mais de mil lagartas de borboletas por dia.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2008/253/vespas-de-vilas-a-parceiras>. Acesso em: abr. 2016.)

SOUZA, D. J. Cortadeiras sob ameaça. *Ciência Hoje*, n. 222, p. 22-29, dez. 2005.

O artigo alerta para o risco de extinção das formigas-cortadeiras, espécies muito combatidas por atacar culturas agrícolas.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/222/cortadeiras-sob-ameaca>. Acesso em: abr. 2016.)

Capítulo 11 – Sucessão ecológica e biomas

FABRICANTE, K. C. T. A.; FABRICANTE, J. R.; ANDRADE, L. A. Jaqueira: uma invasora na mata atlântica. *Ciência Hoje*, v. 49, n. 291, p. 44-48, abr. 2012.

A introdução de espécies exóticas é uma das principais causas da perda de biodiversidade. Na mata atlântica, a presença da espécie invasora *Artocarpus heterophyllus* foi relacionada com a diminuição da diversidade biológica e com a alteração de aspectos químicos do solo dos ambientes invadidos.

FERREIRA, D. A. C. e cols. Mato, grosso até quando? *Ciência Hoje*, n. 248, p. 26-31, maio 2007.

Em tempos de aquecimento global, o Brasil destaca-se no cenário mundial tanto por ter a maior floresta tropical do planeta quanto por ser líder mundial em desmatamento. Entre os estados, Mato Grosso responde por quase 50% do desmatamento anual na Amazônia brasileira.

(Disponível em: < http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2008/248/mato-grosso-ate-quando>. Acesso em: abr. 2016.)

GUIMARÃES, M. A floresta oculta. *Revista Pesquisa Fapesp*, n. 181, p. 50-53, mar. 2011.

O artigo apresenta resultados do projeto Bios Brasil, que investiga a biodiversidade do solo amazônico com o objetivo de entender as relações cíclicas que ligam o solo, os organismos que vivem nele e o uso feito pelas populações humanas.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2011/03/16/a-floresta-oculta/>. Acesso em: abr. 2016.)

LACERDA, L. D. e cols.. Manguezais do Nordeste e mudanças ambientais. *Ciência Hoje*, n. 229, p. 24-29, ago. 2006.

Por reagir rapidamente a mudanças no ambiente costeiro, os manguezais fornecem dados valiosos sobre a dinâmica ambiental da área litorânea. Porém, alterações em sua distribuição e extensão podem influir na ecologia local. O artigo discute o mapeamento detalhado das áreas de manguezal do Nordeste, que permite conhecer os impactos sobre esse importante ecossistema e prever o alcance desses efeitos sobre toda a zona costeira.

MENEZES, M. P. M.; MEHLIG, U. Manguezais: as florestas da Amazônia costeira. *Ciência Hoje*, n. 264, p. 34-39, out. 2009.

Os manguezais da costa amazônica formam o maior cinturão de manguezais do mundo. Trata-se de um grande berçário de várias espécies de peixes, crustáceos e aves ainda desconhecido pela maioria dos brasileiros. O artigo alerta para os impactos ambientais provocados pela ocupação indevida, a pesca excessiva e o cultivo de arroz na região.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2009/264/manguezais-as-florestas-da-amazonia-costeira>. Acesso em: abr. 2016.)

NAVA, A. F. D. e cols. Consequências epidemiológicas da fragmentação florestal. *Ciência Hoje*, n. 218, p. 66-67, ago. 2005.

O artigo mostra como o estudo de populações de porcos-do-mato em um parque estadual no oeste do estado de São Paulo ajuda a identificar a “saúde” da mata atlântica do interior paulista. O principal objetivo do projeto é analisar as características epidemiológicas e os aspectos sanitários desses mamíferos para determinar a correlação entre a fragmentação do hábitat e a incidência de transmissão de doenças entre essas espécies e animais domésticos do entorno.

ROCHA, L. D.; MARANHO, L. T. Desertificação no Paraná. *Ciência Hoje*, n. 253, p. 62-63, out. 2008.

A desertificação no Brasil atinge regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, principalmente no Norte e Nordeste. O artigo mostra que também no Sul do país, no Paraná, fortes processos erosivos degradam os solos, abrindo caminho para a desertificação.

ROCHA, V. T. e cols. Pau-brasil: um símbolo nacional sob ameaça. *Ciência Hoje*, n. 226, p. 22-29, maio 2006.

O pau-brasil é a madeira símbolo do país por conta de sua própria história. Essa árvore foi protagonista de um ciclo econômico e rendeu muitos lucros a Portugal, apesar de ter causado problemas entre a metrópole e outros países que disputavam sua exploração, como Holanda e França. Atualmente, as reservas dessa espécie estão restritas a áreas de conservação e a trechos do litoral onde a mata atlântica ainda sobrevive. Os autores mostram medidas aplicadas na época da publicação do artigo para conservar o pau-brasil e como é possível utilizar sua madeira de modo sustentável.

SOUZA, A. F. Araucária: regeneração das populações da árvore-símbolo do sul do Brasil. *Ciência Hoje*, n. 260, p. 38-43, jun. 2009.

Apesar de sua importância para a ecologia das paisagens do sul do Brasil, até recentemente não havia uma descrição detalhada sobre a regeneração das araucárias em florestas conservadas ou nas degradadas pela extração de madeira. Essa comparação foi realizada pela primeira vez em dois estudos, cujos resultados são apresentados e discutidos nesse artigo.

SVERTEGARAY, D. M. A. Agronegócio e desertificação no Brasil. *Ciência Hoje*, n. 211, p. 50-53, dez. 2004.

Considerado o principal motor do desenvolvimento do país, o agronegócio vem provocando sérios danos aos principais biomas brasileiros.

Capítulo 12 – A humanidade e o ambiente

ARTAXO, P. A Amazônia e as mudanças globais. *Ciência Hoje*, n. 224, p. 20-25, mar. 2006.

Desmatamentos e queimadas na Amazônia podem acelerar processos como aquecimento global, aumentar a ocorrência de fenômenos climáticos extremos e alterar em larga escala os ciclos da água e de nutrientes, essenciais aos seres vivos. O artigo discute os resultados de alguns estudos sobre as interações da floresta com a atmosfera.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2006/224/a-amazonia-e-as-mudancas-globais>. Acesso em: abr. 2016.)

BASTOS, F. M.; COUTINHO, R. Viajantes clandestinos. *Ciência Hoje*, n. 245, p. 26-31, fev. 2008.

Navios que percorrem o mundo podem carregar nos cascos um grande número de organismos incrustantes. Esse transporte é responsável pela introdução de espécies marinhas em outros ambientes, em muitos casos com efeitos negativos para as espécies nativas. Esse fenômeno é responsável por grandes prejuízos econômicos e ecológicos, como discute o artigo.

BLOOM, B. Saúde pública em transição. *Scientific American Brasil*, n. 41, p. 89-91, out. 2005.

Males crônicos alastram-se por diversos países e infecções continuam sendo uma ameaça. É preciso rever com urgência as prioridades sanitárias mundiais.

COSTA, F. A. P. L. Primórdios do aquecimento global. *Ciência Hoje*, n. 238, p. 76-78, jun. 2007.

O trabalho lembra a publicação na revista sueca *Tellus*, em 1957, de um artigo que trouxe à tona a discussão sobre o aquecimento global. O texto revelava que os oceanos não eram um escoadouro para o excesso de dióxido de carbono (CO_2) liberado na atmosfera, estabelecendo, assim, uma conexão entre as emissões decorrentes das atividades humanas e a possibilidade de alterações na composição química da atmosfera terrestre.

DALY, H. Sustentabilidade em um mundo lotado. *Scientific American Brasil*, n. 41, p. 92-99, out. 2005.

A sociedade não pode mais fingir que a economia global opera em um ecossistema ilimitado. É preciso descobrir como aumentar a prosperidade sem esgotar os recursos naturais.

DELCIELLOS, A. C.; LORETO, D. O mundo invadido: consequências atuais das invasões biológicas. *Ciência Hoje*, n. 238, p. 24-29, jun. 2007.

As invasões de animais e plantas são apontadas hoje como a segunda maior causa de perda de biodiversidade nos ecossistemas naturais do mundo. Quando suas consequências se tornam perceptíveis, os danos, na maioria dos casos, já são irreversíveis. O Brasil não está livre desse tipo de problema, e a falta de políticas oficiais de prevenção e de estudos científicos em longo prazo contribui para agravar o quadro. O artigo mostra espécies que ameaçam o ecossistema brasileiro e animais nativos daqui que já invadiram outros territórios.

EIGENHEER, E. M.; FERREIRA, J. A. Lixo: compreender para esclarecer. *Ciência Hoje*, n. 227, p. 30-33, jun. 2006.

A imensa quantidade de lixo gerado nas cidades representa um desafio para seus administradores e para a população. Compreender a complexidade do sistema de limpeza urbana é decisivo para educar a população e obter sua participação nas soluções.

FIALA, N. O efeito estufa dos hambúrgueres. *Scientific American Brasil*, n. 82, p. 76-79, mar. 2009.

A produção de carne bovina tem um custo ambiental negligenciado, pois libera enormes quantidades de gases que contribuem para o efeito estufa.

GARÓFALO, C. A. A destruição que se espalha. *Scientific American Brasil*, n. 84, p. 48-49, maio 2009.

Pesticidas agrícolas afetam os insetos, as safras e a saúde humana.

JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. Um caminho para a energia sustentável até 2030. *Scientific American Brasil*, n. 91, p. 34-41. dez. 2009.

Tecnologias eólicas, hídricas e solares podem prover 100% da energia mundial, eliminando o uso de combustíveis fósseis.

KAREIVA, P.; MARVIER, M. Conservação voltada para as pessoas. *Scientific American Brasil*, n. 66, p. 66-73, nov. 2007.

Colocar a natureza e a biodiversidade contra as pessoas não faz sentido. Ambientalistas defendem que a saúde e o bem-estar humanos devem integrar os esforços de preservação.

KEMENES, A.; FORSBERG, B.; MELACK, J. As hidrelétricas e o aquecimento global. *Ciência Hoje*, n. 245, p. 20-25, fev. 2008.

Os combustíveis fósseis são a maior fonte de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Entretanto, outras formas de geração de energia têm participação significativa nesse problema, inclusive modalidades consideradas mais "limpas", como as usinas hidrelétricas. O artigo mostra que essas usinas são responsáveis por 4% das emissões mundiais de gás carbônico e 18% das emissões de metano provenientes da ação humana. Esses gases são derivados da decomposição das plantas que se localizavam na área de alagamento das usinas.

KEPPLER, F.; RÖCKMANN, T. Metano, plantas e mudança de clima. *Scientific American Brasil*, n. 58, p. 50-55, mar. 2007.

A surpreendente descoberta de que as plantas produzem um poderoso contribuinte do efeito estufa levanta questões sobre como administrar o aquecimento global.

KUGLER, H. Hidrelétricas: o mito da energia limpa. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 44-46, out. 2012.

Ao contrário do que se pensa, o impacto das hidrelétricas sobre o meio ambiente não é baixo. Perda de biodiversidade local, emissão de gases de efeito estufa, qualidade da água e até disseminação de doenças são subestimadas pelos gestores de projetos hidrelétricos.

LACERDA, L. D. Amargo pesadelo. *Ciência Hoje*, n. 226, p. 76-78, maio 2006.

O artigo resgata a história da doença de Minamata, descoberta oficialmente no Japão em 1956. Essa moléstia do sistema nervoso central é causada pela exposição ao mercúrio e levou 52 pacientes ao hospital naquele ano. O nome Minamata se deve ao local de origem da doença, onde havia uma indústria química que utilizava mercúrio na sua produção e contaminava o ambiente.

LIMA JR., D. P.; LATINI, A. O. E se a aquicultura se expandir no Brasil? *Ciência Hoje*, n. 226, p. 58-60, maio 2006.

A criação de peixes em cativeiro é uma atividade estimulada pelo governo, que tornou a legislação menos restritiva. No artigo, os autores defendem que a aquicultura é uma atividade capaz de estimular o desenvolvimento socioeconômico, mas ressaltam que é preciso realizar um amplo debate sobre os possíveis problemas ambientais dela decorrentes.

MAGALHÃES, A. L. B.; BARBOSA , N. P. V.; JACOBI, C. M. Peixes de aquário: animais de estimação ou pestes? *Ciência Hoje*, n. 266, p. 40-45, dez. 2009.

A criação de peixes ornamentais é uma atividade de lazer muito popular, mas constitui uma ameaça aos ecossistemas marinhos e de água doce. Quando libertados em um meio em que não são nativos, os peixes de aquário podem gerar impactos ambientais e até prejudicar a saúde humana.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2009/266/peixes-de-aquario-animais-de-estimacao-ou-pestes>. Acesso em: abr. 2016.)

NEVES, W. A. e cols. Coivara: cultivo itinerante na floresta tropical. *Ciência Hoje*, v. 50, n. 297, p. 26-30, out. 2012.

Hoje restrita às regiões tropicais do planeta, a coivara é um tipo tradicional de agricultura que coloca em discussão a sustentabilidade e a conservação de florestas tropicais.

PINSTRUP-ANDERSEN, P.; CHENG, F. Os que ainda têm fome. *Scientific American Brasil*, n. 65, p. 66-73, out. 2007.

Os autores afirmavam, na época em que o artigo foi publicado, que um oitavo da população do mundo não dispunha do suficiente para comer.

RUDDIMAN, W. F. Quando os humanos começaram a alterar o clima? *Scientific American Brasil*, n. 35, p. 58-65, abr. 2005.

Hipótese alternativa sugere que a Terra começou a aquecer com as práticas agrícolas de nossos ancestrais, muito antes da industrialização e da queima de carvão.

SANTOS, I. R. Naves flutuantes de plástico. *Ciência Hoje*, n. 220, p. 64-65, out. 2005.

Cascos de navios e garrafas de plástico jogadas no mar provocam a redução da biodiversidade do planeta. Como? Organismos aquáticos pegam carona nesses meios de transporte e chegam a novos hábitats, muitas vezes levando a desequilíbrios em ecossistemas e transmitindo doenças virais. A situação mais preocupante é do continente antártico; leia o artigo e saiba por quê.

SANTOS, I. R. Plásticos na dieta da vida marinha. *Ciência Hoje*, n. 230, p. 50-51, set. 2006.

O artigo discute um problema que afeta os animais marinhos: a ingestão de objetos plásticos jogados nas águas pelos seres humanos. É possível encontrar artefatos plásticos sobre a crista de cada onda do mar. Esses resíduos, levados pelas correntes marinhas até as mais longínquas praias, acabam sendo ingeridos por peixes e tartarugas.

SAPOLSKY, R. Doentes de pobreza. *Scientific American Brasil*, n. 45, p. 74-81, fev. 2006.

O estresse imposto por condições precárias de pobreza exerce uma influência negativa na saúde humana, aumentando o risco de problemas psiquiátricos, imunológicos e cardíacos.

SAZIMA, S. P. B. Invasores impiedosos. *Ciência Hoje*, n. 231, p. 71-73, out. 2006.

No artigo, o tema é a introdução de peixes predadores que ameaçam as espécies nativas no Rio Tietê, em São Paulo. O fato pode afetar a diversidade dos animais capturados na pesca artesanal, fonte de subsistência e de renda para várias populações ribeirinhas.

SCHMID, A. L. Poluição dentro de casa: por que a qualidade do ar nos interiores é motivo de preocupação? *Ciência Hoje*, n. 248, p. 20-25, maio 2007.

Pode parecer irônico, mas quem trabalha nas ruas tem menos motivo para se preocupar com a saúde pulmonar do que quem trabalha em lugares fechados. A qualidade do ar tende a ser pior dentro de edifícios, casas e lugares fechados do que fora deles, como apontou um estudo brasileiro. Os mesmos poluentes presentes do lado externo podem ser encontrados dentro dos ambientes residenciais em grandes concentrações, pois não se dispersam com facilidade. Esse intrigante problema é o tema do artigo.

SILVA, R. W. C.; MALAGUTTI FILHO, W. Cemitérios: fontes potenciais de contaminação. *Ciência Hoje*, n. 263, p. 24-29, set. 2009.

A falta de medidas de proteção ambiental no sepultamento de corpos humanos em covas no solo fez que a área de muitos cemitérios fosse contaminada por diversas substâncias, orgânicas e inorgânicas, e por microrganismos patogênicos. Essa contaminação ocorre quando os cemitérios são implantados em locais que apresentam condições ambientais desfavoráveis. O artigo discute esse problema e defende que o Brasil adote uma política eficiente de planejamento e de gestão ambiental dos cemitérios.

(Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2009/263/cemiterios-fontes-potenciais-de-contaminacao>. Acesso em: abr. 2016.)

TURRA, A.; MALUF, A.; MANZANO, A. B. Invasão de plástico nos oceanos. *Ciência Hoje*, n. 246, p. 40-45, mar. 2008.

O plástico está entre os principais poluentes que ameaçam os ambientes marinhos. Ele pode ser encontrado nos oceanos na forma de produtos finais (fios, sacos, garrafas) ou de grânulos, pequenas esferas utilizadas como matéria-prima pela indústria. Esses grânulos chegam aos mares por falhas na produção ou no transporte e podem causar diversos problemas econômicos e ambientais, como discute esse artigo.

VASCONCELOS, Y. Bactérias mineradoras. *Revista Pesquisa Fapesp*, n. 200, p. 92-95, out. 2012.

A exemplo da biolixiviação, microrganismos poderiam auxiliar na recuperação de cobre em rejeitos rochosos. A técnica aumentaria o retorno econômico e reduziria o impacto ambiental da mineração.

(Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wpcontent/uploads/2012/10/092-095_extracaominerios_200.pdf>. Acesso em: abr. 2016.)

YOUNG, C. E. F. Desenvolvimento e meio ambiente: uma falsa incompatibilidade. *Ciência Hoje*, n. 211, p. 30-34, dez. 2004.

A ideia de que as políticas ambientais prejudicam o desenvolvimento é desmentida por estudos que relacionam desmatamento e indicadores econômicos.

ZOLNERKEVIC, I. Efeitos globais do bife brasileiro. *Scientific American Brasil*, n. 82, p. 80-83, mar. 2009.

O desmatamento na Amazônia para abrir pastagens é responsável por aproximadamente 50% dos gases de efeito estufa no país.

7 Atividades complementares

1. Atividade prática: Simulando a transmissão de algumas características humanas

Nesta atividade, divida os alunos em duplas para simular a transmissão de determinadas características hereditárias, orientando que os sorteios devem ser feitos com uma moeda para representar a aleatoriedade na combinação dos gametas.

O primeiro passo é determinar, por meio da observação dos fenótipos, o genótipo de cada integrante da dupla para cada uma das características a seguir. Nos casos em que não for possível determinar se o genótipo é heterozigoto ou homozigoto dominante, opte pelo heterozigoto, para fins didáticos.

- **Forma do rosto**: pode ser oval (genótipos QQ ou Qq) ou quadrado (genótipo qq). A escolha da letra Q para representar os alelos segue a convenção de empregar a inicial do caráter recessivo;
- **Tipo de cabelo**: pode ser crespo (genótipo C^CC^C), liso (genótipo C^LC^L) ou ondulado (genótipo C^CC^L). Nesse caso, como se trata de ausência de dominância, escolhemos a inicial da característica (letra C) com o índice C ou L para representar os alelos;
- **Espessura da sobrancelha**: pode ser grossa (genótipos EE ou Ee) ou estreita (genótipo ee);
- **Espaço entre os olhos**: os olhos podem ser mais juntos (genótipo O^JO^J), mais separados (genótipo O^SO^S) ou medianamente separados (genótipo O^JO^S);
- **Largura do nariz**: o nariz pode ser estreito (genótipo N^EN^E), largo (genótipo N^LN^L) ou de largura média (genótipo N^EN^L);
- **Espessura dos lábios**: os lábios podem ser finos (genótipo L^FL^F), grossos (genótipo L^GL^G) ou de espessura média (genótipo L^FL^G);
- **Forma do lobo da orelha**: o lobo pode ser livre (genótipos AA ou Aa) ou aderente (genótipo aa);
- **Covinhas**: pode haver covinhas em torno da boca (genótipos CC ou Cc) ou não (genótipo cc);
- **Queixo**: o queixo pode ter um "furinho" central (genótipos FF ou Ff) ou não (genótipo ff).

Agora, os estudantes devem simular a transmissão dessas características, assumindo um casal hipotético com os mesmos genótipos que eles determinaram.

Para representar cada elemento do rosto do filho formado nessa união, utilize uma reprodução (escaneada ou xerocopiada) dos modelos nas páginas 347 e 348 deste **Suplemento**. Oriente os estudantes a recortar essas cópias e a montar o rosto de acordo com as instruções a seguir. Alternativamente, os estudantes podem optar por fazer seu próprio desenho, com base nos modelos fornecidos.

Inicialmente, deve ser sorteado o sexo do filho imaginário.

Depois, deve ser sorteada cada característica dele pelo lançamento de uma moeda. Por exemplo, vamos supor que um membro do casal hipotético tenha rosto oval, com genótipo heterozigótico (Qq). Nesse caso, convenciona-se que uma das faces da moeda represente o alelo Q e que a outra face represente o alelo q. A probabilidade de formar-se um gameta portador de Q é $\frac{1}{2}$, e a chance de se formar um gameta portador de q é também $\frac{1}{2}$. O estudante que representa esse membro do casal lança a moeda e anota o resultado; o outro estudante deve fazer o mesmo. Se a combinação sorteada for QQ ou Qq, os estudantes devem usar o contorno de rosto oval como gabarito para a montagem do filho imaginário; se for qq, devem usar o contorno de rosto quadrado. Esse mesmo procedimento deve ser usado para determinar as demais características do rosto.

Ao final, faça a comparação e a discussão com os estudantes do resultado de todas as duplas.

Encaminhamento

Essa atividade é dinâmica e costuma despertar o interesse dos alunos. Certifique-se de que os materiais que serão empregados pelas duplas, como as cópias e as moedas, sejam providenciados antecipadamente. Explique aos alunos que o emprego da moeda na seleção das características simula a aleatoriedade do processo.

Aproveite a oportunidade para rever conceitos abordados no capítulo 1, como herança biológica (ou hereditariedade), genes, dominância, alelo dominante, alelo recessivo, homozigoto, heterozigoto, fenótipo e genótipo. Vale lembrar que os produtos finais dessa atividade podem variar bastante; por isso, é preciso avaliar os modelos elaborados pelos alunos e ajudá-los a desfazer eventuais dúvidas. Durante a dinâmica, incentive a troca de informações entre os estudantes.

2. Atividade prática: Simulando a permutação cromossômica e a recombinação gênica na meiose

Nesta atividade, serão utilizados os mesmos materiais e princípios da atividade do “Faça você mesmo!” do capítulo 2.

Oriente os estudantes a modelar apenas um par de cromossomos homólogos metacêntricos de cores diferentes (por exemplo, vermelha e laranja). Eles devem ser longos para facilitar a simulação da permutação.

Devem ser aplicadas, nesse par cromossômico, as letras *A* e *a*, como foi feito na atividade mencionada, e também as letras *B* e *b*. Note que se trata de genes ligados, isto é, localizados no mesmo cromossomo. Os alelos do par *Aa* devem ser aplicados a uma distância relativamente grande dos alelos do par *Bb*, o que facilita a simulação da permutação. Leve os estudantes a notar que há duas maneiras de dispor os alelos desses pares heterozigóticos no par de homólogos e estimule-os a registrar as duas.

O primeiro passo da simulação é representar a duplicação cromossômica. Os alelos das duas cromátides de um cromossomo duplicado são idênticos, uma vez que resultam da duplicação exata do cromossomo original.

Oriente os estudantes a simular a meiose sem ocorrência de permutação e a anotar os tipos de gameta que se formam.

Em seguida, eles devem simular a meiose com a ocorrência de uma permutação entre os dois locos gênicos considerados. Para isso, os cromossomos homólogos duplicados devem ser colocados lado a lado, representando o emparelhamento cromossômico que ocorre na prófase I da meiose. Uma vez emparelhados, corta-se uma cromátide de cada cromossomo em pontos correspondentes. Lembre-se de que a permutação só afetará esse par de genes se esse corte ocorrer em um ponto entre os dois locos.

Cada cromátide cortada deve ser emendada à cromátide do cromossomo homólogo. Terminada a troca de pedaços entre as cromátides homólogas, isto é, a permutação, oriente os estudantes a dar continuidade à simulação da meiose até a formação dos gametas e a anotar os tipos de gameta que serão formados no que se refere às combinações gênicas. Para finalizar o trabalho, promova uma discussão que permita aos estudantes expor as diferenças entre os cromossomos desses gametas e os cromossomos da célula que iniciou o processo meiótico.

3. Atividade prática: Construindo um anuário do tempo geológico

O objetivo desta atividade é trabalhar com a escala de tempo geológico e localizar temporalmente alguns eventos da história da vida na Terra, desde seus primórdios até hoje. O desafio consiste em condensar os 4,6 bilhões de anos de existência de nosso planeta em um só ano e construir um “anuário” do tempo geológico. O formato será o de um calendário com doze meses, no qual serão registrados eventos marcantes na história da vida (veja o modelo na página 349 deste **Suplemento** e reproduza-o para os estudantes). Por exemplo, no dia 1º de janeiro, há 4,6 bilhões de anos, surgiu a Terra. Os primeiros vestígios de seres vivos, datados em 3,5 bilhões de anos, corresponderiam ao dia 27 de março e assim por diante. Lembre os alunos de fazer o mês de dezembro em tamanho maior, uma vez que ele concentrará os principais eventos relacionados.

Antes de marcar os eventos no calendário, deve ser elaborada uma tabela de quatro colunas e quinze linhas relacionando os seguintes dados:

- Na primeira coluna, devem ser escritos os principais eventos: 1) Primeiras evidências de seres vivos; 2) Origem da fotossíntese; 3) Origem dos seres eucarióticos; 4) Abundância de fósseis (“explosão cambriana”); 5) Origem das plantas de terra firme; 6) Origem dos anfíbios; 7) Origem dos répteis; 8) Origem dos dinossauros e dos primeiros mamíferos; 9) Extinção dos dinossauros e início da expansão dos mamíferos; 10) Origem dos primatas; 11) Ancestral comum dos pongídeos e hominídeos; 12) Primeiros hominídeos; 13) Origem da espécie humana.
- Na segunda coluna, deve ser informado há quanto tempo aproximadamente ocorreu cada evento.
- Na terceira coluna, devem ser colocados os dias decorridos no anuário.
- Na quarta coluna, deve ser inserida a data do evento no anuário (veja modelo).

Tabela – Anuário do tempo geológico

Evento	Ocorrido há aproximadamente	Dias decorridos em nosso anuário	Dia do evento
Primeiras evidências de seres vivos			
Origem da fotossíntese			
Origem dos seres eucarióticos			
Abundância de fósseis ("explosão cambriana")			
Origem das plantas de terra firme			
Origem dos anfíbios			
Origem dos répteis			
Origem dos dinossauros e dos primeiros mamíferos			
Extinção dos dinossauros e início da expansão dos mamíferos			
Origem dos primatas			
Ancestral comum dos pongídeos e hominídeos			
Primeiros hominídeos			
Origem da espécie humana			

Propomos as questões a seguir para serem trabalhadas com os alunos.

a) Como temos que fazer a equivalência entre os 4,6 bilhões de anos de existência da Terra e os 366 dias do calendário (consideramos um ano bissexto), quanto vale um dia do nosso anuário levando em conta o tempo geológico?

b) A quantos anos do tempo geológico corresponderão uma hora e um minuto, respectivamente? Esses cálculos devem ser utilizados para preencher a terceira coluna da tabela (Dias decorridos em nosso anuário) e, em seguida, a quarta coluna (Dia do evento). Para calcular eventos ocorridos há poucos milhões de anos, é mais fácil usar o número de horas ou de minutos e contar o tempo a partir do fim do ano. A data de ocorrência de outros eventos também pode ser calculada.

Resposta

a) Para obter o valor de um dia no anuário é preciso dividir os 4,6 bilhões de anos por 366 dias. O resultado é que um dia do anuário equivale a 12.586.000 anos.

b) Dividindo 12.586.000 por 24 (o número de horas do dia), obtêm-se 523 mil anos. Esse é o valor de uma hora do anuário. Se dividimos esse valor por 60 (o número de minutos em uma hora), obtemos o valor de um minuto em nosso anuário: 8.700 anos.

Para calcular, por exemplo, quantos dias teriam se passado desde o início de nosso ano geológico até a data dos primeiros vestígios de seres vivos, basta subtrair 3,5 bilhões (primeiros vestígios de vida) de 4,6 bilhões (origem da Terra) e dividir o resultado por 12.586.000:

$$4.600.000.000 - 3.500.000.000 =$$
$$= 1.100.000.000 \rightarrow 1.100.000.000 \div 12.586.000 = 87$$

Portanto, no anuário geológico, 87 dias a partir de 1º de janeiro correspondem à data de 27 de março.

Para localizar no anuário a origem da espécie humana moderna (150 mil anos atrás), basta dividir 150.000 por 8.700, o valor de um minuto em nosso anuário:

$$150.000 \div 8.700 = 17$$

Isso quer dizer que a espécie humana surgiu apenas 17 minutos antes de nosso ano imaginário terminar, ou seja, às 23h 43min do dia 31 de dezembro. Ajude os alunos a encontrar os dados no capítulo e a fazer os cálculos. Ao final, a tabela preenchida ficará assim:

Tabela – Anuário do tempo geológico

Evento	Ocorrido há aproximadamente	Dias decorridos em nosso anuário	Dia do evento
Primeiras evidências de seres vivos	3,5 bilhões de anos	87	27 de março
Origem da fotossíntese	2,5 bilhões de anos	167	15 de junho
Origem dos seres eucarióticos	2 bilhões de anos	206	24 de julho
Abundância de fósseis ("explosão cambriana")	570 milhões de anos	320	15 de novembro
Origem das plantas de terra firme	438 milhões de anos	331	26 de novembro
Origem dos anfíbios	408 milhões de anos	333	28 de novembro
Origem dos répteis	360 milhões de anos	337	2 de dezembro
Origem dos dinossauros e dos primeiros mamíferos	245 milhões de anos	346	11 de dezembro
Extinção dos dinossauros e início da expansão dos mamíferos	66 milhões de anos	360	25 de dezembro
Origem dos primatas	55 milhões de anos	361	27 de dezembro
Ancestral comum dos pongídeos e hominídeos	8 milhões de anos	365 (+ 9h)	31 de dezembro, 9h
Primeiros hominídeos	2 milhões de anos	365 (+ 20h)	31 de dezembro, 20h
Origem da espécie humana	150 mil	365 (+ 23h 43min)	31 de dezembro, 23h 43min

4. Atividade de pesquisa: Ocupação e exploração dos biomas pelos seres humanos

O capítulo 11 fornece boa oportunidade para uma atividade com a disciplina de Geografia. Além dos aspectos ecológicos, florísticos e faunísticos ressaltados no texto do capítulo, poderiam ser pesquisadas as características da ocupação e da exploração humana em cada bioma. Por exemplo, ao abordar a história da ocupação humana em um bioma como a floresta amazônica, poderia ser estudado como era (ou é) o manejo das matas por etnias indígenas que viviam (ou vivem) na floresta. O mesmo pode ser feito para outros biomas do mundo e do Brasil. Como se trata de muitos biomas, é conveniente planejar a atividade com antecedência e dividir a classe em grupos para facilitar as pesquisas.

5. Atividade de pesquisa e debate: O petróleo vai mesmo acabar?

Inicie a atividade expondo a importância de se refletir sobre os combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral. Atualmente, eles movimentam praticamente toda a indústria e veículos do mundo. O problema é que as reservas desses recursos na natureza diminuem rapidamente e um dia se esgotarão.

Estimule os estudantes a pensar em um mundo sem petróleo ou sem carvão e a tentar avaliar o grau de informação e de interesse das pessoas próximas (como familiares e amigos) sobre esse tema.

A seguir, estimule-os a pesquisar mais sobre o assunto. Questões para orientar a pesquisa podem ser:

- Quando e como se formaram o petróleo e o carvão mineral?
- Por que esses recursos são chamados de não renováveis?
- Quais são os principais países produtores de petróleo?
- Qual é a importância política desse recurso?
- Quais são as alternativas energéticas ao petróleo e ao carvão?
- Como será o mundo sem os combustíveis fósseis?

As respostas a essas questões, bem como outras informações interessantes sobre produção e consumo de petróleo, podem ser obtidas nos endereços eletrônicos a seguir:

- <http://economia.ig.com.br/empresas/infraestrutura/2012-08-16/veja-como-e-explorado-o-petroleo-no-fundo-do-mar.html>;
- <http://revistaautoesporte.globo.com/Especiais/noticia/2013/03/infografico-do-petroleo-gasolina-do-seu-carro.html>;
- <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2012/05/formacao-do-petroleo-requer-condicoes-especiais-de-temperatura.html>;
- <http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/os-maiores-produtores-e-consumidores-de-petroleo-do-mundo>;
- <www.socioambiental.org/esp/bm/alt.asp>.

Proponha como desafio a criação de um texto narrativo ficcional, ambientado no futuro (especifique o ano), com ênfase nas alternativas energéticas que a humanidade terá de desenvolver em substituição aos combustíveis fósseis. Permita que cada estudante compartilhe seu texto com os colegas e realize uma discussão sobre todas as ideias dos estudantes.

Essa atividade permite a integração com a disciplina de Língua Portuguesa. Aproveite a oportunidade para rever com os estudantes quais são os elementos que caracterizam uma narrativa. Com os textos em mãos, estudantes e professor podem debater sobre as fontes alternativas sugeridas e destacar as ideias mais criativas e aquelas viáveis.

Ressalte que a humanidade vem buscando fontes para substituir os combustíveis fósseis e muitas dessas alternativas já foram testadas; algumas parecem ser bastante eficientes e até econômicas. Proponha questões aos alunos para que eles reflitam sobre isso, por exemplo: "É possível que essas alternativas estejam sendo mantidas em 'segredo' para benefício econômico dos países produtores de petróleo?"

Essas questões possibilitam a integração com a disciplina de Geografia. Os alunos podem enriquecer o trabalho com uma pesquisa sobre o montante envolvido em uma indústria petrolífera e como o preço do barril de petróleo influencia diretamente a economia mundial. No endereço eletrônico <http://veja.abril.com.br/noticia/economia/euasuperarao-arabia-saudita-em-producao-de-petroleo-em-2017> (acesso em: abr. 2016), é possível conhecer as perspectivas dos Estados Unidos em relação à produção do petróleo.

MÓDULO 1 FUNDAMENTOS DA GENÉTICA

CAPÍTULO 1

Lei da herança genética

Questões para exercitar o pensamento

25. O cruzamento entre o macho de asa longa e a segunda fêmea de asa longa resultou em descendentes de asa longa e de asa curta na proporção de 3 : 1, o que é esperado em cruzamentos entre indivíduos heterozigóticos. Pode-se concluir, portanto, que o macho em questão é heterozigótico quanto ao gene que condiciona as formas de asa longa e curta. Como no primeiro cruzamento só foram obtidos descendentes de asa longa, conclui-se que a primeira fêmea era homozigótica dominante. Em resumo, os genótipos dos três indivíduos são: macho = *Cc*; primeira fêmea = *CC*; segunda fêmea = *Cc*.

26. O cruzamento-teste consistiria em cruzar o macho com uma fêmea duplo recessiva (*cc*). Se ele realmente fosse heterozigótico, esperaríamos que 50% da descendência tivesse asa longa (*Cc*) e 50%, asa curta (*cc*).

27. a) Os casais 1 × 2 e 6 × 7 tiveram filhos homozigóticos recessivos, sendo portanto heterozigóticos. O indivíduo 8 é também heterozigótico, pois sua mãe (3) é homozigótica recessiva.

b) O indivíduo 4, filho do casal de heterozigóticos (1 × 2), pode ser homozigótico dominante ou heterozigótico. A probabilidade de ser homozigótico é $\frac{1}{3}$ e de ser heterozigótico é $\frac{2}{3}$.

c) Se o indivíduo 4 for homozigótico dominante, a chance de ele vir a ter um filho homozigótico recessivo com a mulher 3 será zero. No entanto, a chance de ele ser heterozigótico é $\frac{2}{3}$ e, nesse caso, a chance de ele vir a ter um filho homozigótico recessivo com a mulher 3 será de 50% ou $\frac{1}{2}$. A resposta final à questão é obtida multiplicando a probabilidade de ele ser heterozigótico pela probabilidade de vir a ter um filho homozigótico recessivo $\left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}\right)$, ou seja, a resposta é $\frac{1}{3}$.

28. O resultado pode ser explicado admitindo-se ausência de dominância entre dois alelos do gene que determina a cor da pelagem nessa raça de gado. Os homozigóticos para um dos alelos têm pelagem vermelha, os homozigóticos para o outro alelo têm pelagem branca e os heterozigóticos têm pelagem ruã. No cruzamento entre dois heterozigóticos (pelagem ruã) esperam-se: 25% de homozigóticos para um dos alelos (pelagem vermelha), 50% de heterozigóticos (pelagem ruã) e 25% de homozigóticos para o outro alelo (pelagem branca).

29. Esperam-se 150 bezerros vermelhos $\left(\frac{1}{4} \times 600\right)$, 150 bezerros brancos $\left(\frac{1}{4} \times 600\right)$ e 300 bezerros ruãs $\left(\frac{1}{2} \times 600\right)$.

30. a) O resultado pode ser explicado admitindo-se ausência de dominância entre dois alelos do gene que determina a forma da raiz. Os homozigóticos para um dos alelos têm raiz alongada, os homozigóticos para o outro alelo têm raiz arredondada e os heterozigóticos têm raiz ovalada. Note que a proporção obtida no cruzamento entre plantas com raízes ovaladas é muito próxima de 1 : 2 : 1 (100 : 195 : 105).

b) Rabanetes de raízes arredondadas são homozigóticos quanto a um dos alelos (F^RF^R), enquanto os de raízes ovaladas são heterozigóticos (F^RF^A); o cruzamento entre eles resultará em 50% de plantas de raízes arredondadas (F^RF^R) e 50% de raízes ovaladas (F^RF^A).

Faça você mesmo!

31. É possível assistir a uma simulação de atividade semelhante e ter informações aprofundadas sobre o tema no endereço eletrônico <www.ib.usp.br/microgene/files/manuais-7-PDF.pdf> (acesso em: fev. 2016).

Depois de realizada a simulação, espera-se que os estudantes compreendam que cada cromossomo é composto de uma molécula de DNA condensada e que, portanto, quando os cromossomos são duplicados, os genes também são. Os alelos devem ser idênticos nas cromátides-irmãs. Na anáfase I, separam-se os cromossomos homólogos e, na anáfase II, separam-se as cromátides-irmãs. Ao final da primeira divisão da meiose, o cromossomo de origem materna se separa do cromossomo de origem paterna, cada qual carregando seu alelo. Considere um indivíduo heterozigótico (*Aa*), cuja mãe é homozigótica para o alelo *A* (*AA*) e o pai é homozigótico para o alelo *a* (*aa*). Na separação dos cromossomos homólogos, ao final da anáfase I, os cromossomos de origem paterna e materna se separam e migram para polos opostos da célula, um carregando o alelo *A* e o outro carregando o alelo *a*. A separação física dos dois cromossomos ocasiona a separação do alelo materno do paterno, que ficam contidos em células diferentes. A primeira lei de Mendel diz que os gametas carregam somente um dos fatores que determinam cada característica. Por isso, 50% dos gametas conterá o alelo *A*, e os outros 50%, o alelo *a*.

A Biologia no vestibular e no Enem

8. a) O alelo dominante que condiciona o fenótipo Manx é letal quando em homozigose.

b) Parentais: *Bb* × *Bb;* descendentes: 2 *Bb* : 1 *b*.

9. A mulher é normal e tem um irmão afetado. Como o alelo que condiciona a doença é recessivo, os pais dessa mulher são necessariamente heterozigóticos (*Aa*). Assim, ela pode ser *AA* ou *Aa*, com probabilidade de $\frac{1}{3}$ para *AA* e $\frac{2}{3}$ para *Aa*. Como seu marido é heterozigótico, a probabilidade de o casal vir a ter um filho homozigótico recessivo é $\frac{2}{3} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{6}$ ($\frac{2}{3}$ é a probabilidade de a mulher ser heterozigótica; $\frac{1}{4}$ é a probabilidade de um casal heterozigótico ter um filho homozigótico recessivo).

10. a) Poderiam ser utilizados os tipos A e O. O primeiro, por ser do mesmo tipo, e o tipo O, por ser doador universal, ou seja, suas hemácias não apresentam nenhum dos dois aglutinogênios.

b) A probabilidade é de $\frac{1}{4}$ ou 25%:

Pais: mulher I^Ai × homem I^Bi

Geração possível: $\frac{1}{4}\ I^AI^B : \frac{1}{4}\ I^Ai : \frac{1}{4}\ I^Bi : \frac{1}{4}\ ii$

$P(I^AI^B) = \frac{1}{4}$ ou 25%

CAPÍTULO 2
As bases cromossômicas da herança

Questões para exercitar o pensamento

9. a) Fenótipos e genótipos: $\frac{3}{8}$ de vermelhas

$\left(\frac{1}{8}\ AACc + \frac{2}{8}\ AaCc\right)$: $\frac{3}{8}$ de cremes

$\left(\frac{1}{8}\ AAcc + \frac{2}{8}\ Aacc\right)$: $\frac{2}{8}$ de brancas

$\left(\frac{1}{8}\ aaCc + \frac{1}{8}\ aacc\right)$.

b) O provável genótipo da planta parental de cor creme é *Aacc* e o da planta de cor vermelha é *AaCC*.

10. a)
- Parentais: *BBaa* (caule longo e vagem amarela) × *bbAA* (caule curto e vagem verde)
- Geração F_1: *BbAa* (caule longo e vagem verde)
- Cruzamento: *BbAa* (caule longo e vagem verde) × *bbaa* (caule curto e vagem amarela)
- Descendência do cruzamento-teste:

$\frac{1}{4}\left(\frac{120}{460}\right)$ de caule longo e vagem verde *BbAa*

$\frac{1}{4}\left(\frac{110}{460}\right)$ de caule longo e vagem amarela *Bbaa*

$\frac{1}{4}\left(\frac{119}{460}\right)$ de caule curto e vagem verde *bbAa*

$\frac{1}{4}\left(\frac{111}{460}\right)$ de caule curto e vagem amarela *bbaa*

b) Os dois genes apresentam segregação independente, pois, como mostra o resultado do cruzamento-teste, os indivíduos duplo-heterozigóticos formaram quatro tipos de gameta na proporção de 1 *BA* : 1 *Ba* : 1 *bA* : 1 *ba*.

c) As plantas *BbAa* formarão 4 tipos de gameta na proporção de 1 *BA* : 1 *Ba* : 1 *bA* : 1 *ba*. As plantas *Bbaa* formarão 2 tipos de gameta na proporção de 1 *Ba* : 1 *ba*. As plantas *bbAa* formarão 2 tipos de gametas na proporção de 1 *bA* : 1 *ba*. As plantas *bbaa* formarão apenas um tipo de gameta, *ba*.

11. a) 1 = *CcVv*; 2 = *Ccvv*; 3 = *C_Vv*; 4 = *C_vv*; 5 = *ccVv*; 6 = *C_vv*; 7 = *C_Vv*.

b) Cruzamento: *CcVv* × *ccVv*. Descendência: $\frac{3}{8}$ com crista e penas pretas $\left(\frac{1}{8}\ CcVV + \frac{2}{8}\ CcVv\right)$; $\frac{1}{8}$ com crista e penas vermelhas (*Ccvv*); $\frac{3}{8}$ sem crista e com penas pretas $\left(\frac{1}{8}\ ccVV + \frac{2}{8}\ ccVv\right)$; $\frac{1}{8}$ sem crista e com penas vermelhas (*ccvv*).

Faça você mesmo!

12. A atividade tem por objetivo verificar se os alunos compreenderam os conceitos e as etapas relacionados com a segregação independente dos genes. Antes de elaborar o texto, peça aos alunos que respondam às questões propostas na atividade.

As combinações possíveis entre os cromossomos homólogos seriam vermelho e azul; vermelho e verde; laranja e azul; laranja e verde, considerando o modo como os alunos orientaram os cromossomos. Após a segunda divisão, serão formadas quatro células com metade dos cromossomos da célula inicial, isto é, cada uma terá um cromossomo metacêntrico e um acrocêntrico. A cor dos cromossomos pode variar, dependendo de como foram orientados em relação ao polo. Considerando que o posicionamento dos cromossomos em relação aos polos ocorre ao acaso, um indivíduo *AaBb* produzirá quatro tipos de gametas: *AB*, *ab*, *Ab* e *aB*. Ao refazer a simulação, alterando a orientação dos cromossomos na metáfase I, serão obtidas quatro células com um cromossomo metacêntrico e um acrocêntrico cada, porém com combinação de cores diferente da anterior. O material disponível no endereço eletrônico <http://www.ib.usp.br/microgene/files/manuais-7-PDF.pdf> (acesso em: abr. 2016) apresenta um exemplo de simulação semelhante, além de informações complementares que dão respaldo às discussões em sala de aula.

A Biologia no vestibular e no Enem

6. **a)** Macho: *DdMm*; fêmea: *ddMm*.

b) O filho preto e branco apresenta o genótipo *Ddmm*. Se ele cruzar com uma fêmea com o mesmo fenótipo da mãe (*ddMm*), a chance de terem um descendente com o genótipo *Ddmm* é de $\frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}\right)$.

7. **a)** Alelos: *A* (longo), *a* (curto); *B* (redondo), *b* (oval). Ao cruzar as linhagens homozigotas será obtida a geração F_1 que, intercruzada, produzirá, na geração F_2, plantas com caule curto e frutos ovais. Cruzamentos:

- P: *AAbb* × *aaBB*
- F_1: AaBb × AaBb
- F_2: 9 A_B_ : 3 A_*bb* : 3 *aa*B_ : 1 *aabb*

b) A proporção esperada para plantas com caule curto e frutos ovais (*aabb*) é de $\frac{1}{16}$.

8. Sim, a segunda lei de Mendel considera apenas a segregação independente, o que só ocorre quando se consideram locos em cromossomos diferentes. Nesse caso, os genes estão em um mesmo cromossomo, por isso se diz que estão ligados.

9. **a)** Tipos de gametas: *AbD*, *Abd*, *aBD* e *aBd*.

b) Pares de alelos com segregação independente: *Aa* e *Dd*; *Bb* e *Dd*.

CAPÍTULO 3
Herança e sexo

Questões para exercitar o pensamento

13. Em F_2 apenas os machos apresentaram o fenótipo recessivo, o que indica o alelo recessivo em hemizigose (dose simples). O sexo heterogamético, portanto, é o masculino.

14. Recomenda-se analisar o heredograma desenhado pelos alunos e orientá-los no seguinte raciocínio: uma criança do sexo masculino tem o cromossomo Y proveniente de seu pai, que, por sua vez, o herdou de seu pai (avô paterno da criança). A probabilidade de seu cromossomo Y ser proveniente de seu avô paterno é 1 (100%). O cromossomo X veio da mãe da criança, que recebeu um dos cromossomos X de sua mãe (avó materna) e outro de seu pai (avô materno). A chance de transmitir o X da avó materna é, portanto, $\frac{1}{2}$. Combinando as probabilidades, temos: $\frac{1}{2}$ (probabilidade de o X vir da avó materna) × 1 (probabilidade de o Y vir do avô paterno) = $\frac{1}{2}$.

15. **a)** Geração P: macho hemofílico (X^hY) × fêmea homozigótica normal (X^HX^H); descendência: $\frac{1}{2}$ fêmeas normais heterozigóticas (X^HX^h) e $\frac{1}{2}$ machos normais (X^HY).

b) Geração P: macho normal (X^HY) × fêmea normal heterozigótica (X^HX^h); descendência: $\frac{1}{4}$ fêmeas normais homozigóticas (X^HX^H) : $\frac{1}{4}$ fêmeas normais heterozigóticas (X^HX^h) : $\frac{1}{4}$ machos normais (X^HY) : $\frac{1}{4}$ machos hemofílicos (X^hY).

16. Cruzamento: $Z^BWRr \times Z^bZ^brr$. Descendência: 25% de machos barrados de crista rosa (Z^BZ^bRr), 25% de machos barrados de crista simples (Z^BZ^brr), 25% de fêmeas não barradas de crista rosa (Z^bZ^bRr) e 25% fêmeas não barradas de crista simples (Z^bZ^brr).

17. **a)** A mulher possui um irmão afetado, o que indica que sua mãe deve ser heterozigótica (X^DX^d). Assim, a chance de um descendente do sexo masculino dessa mulher ser afetado é de 25%, ou $\frac{1}{4}$, o que corresponde à multiplicação de $\frac{1}{2}$ (probabilidade de a mulher herdar o alelo da doença de sua mãe) por $\frac{1}{2}$ (probabilidade de transmitir o alelo da doença para um filho homem).

b) A probabilidade é 25%, ou $\frac{1}{4}$, o que corresponde à multiplicação de $\frac{1}{2}$ (probabilidade de a mãe da mulher ter recebido o alelo da doença de sua mãe, heterozigótica) por $\frac{1}{2}$ (probabilidade de a mulher ter recebido o alelo da doença da mãe).

18. Para estimular o envolvimento dos alunos na atividade, pergunte se algum deles é daltônico ou se conhecem uma pessoa daltônica. Incentive-os a imaginar as dificuldades enfrentadas por essas pessoas em atividades do dia a dia. Para a elaboração do texto, estimule os alunos a observar atentamente os semáforos e as placas de trânsito na região onde moram. A atividade pode ser enriquecida com uma entrevista com profissionais do órgão de trânsito local para verificar se há projetos de adequação da sinalização em andamento ou previstos ou com o depoimento de pessoas daltônicas relatando as dificuldades e os meios que encontraram para driblar as dificuldades. Permita que os alunos compartilhem as informações coletadas com os colegas e incentive a discussão sobre quais melhorias poderiam ser realizadas na região para minimizar as dificuldades enfrentadas pelos daltônicos no dia a dia. Os textos produzidos pelos alunos são pessoais e apresentarão variações dependendo do município em que vivem. A atividade permite integração com a disciplina de Língua Portuguesa.

A Biologia no vestibular e no Enem

6. a) O indivíduo é do sexo masculino.

b) A hemofilia é uma anomalia recessiva e ligada ao cromossomo X. Indivíduos do sexo masculino possuem um único cromossomo X, assim, basta um alelo recessivo para que eles manifestem o fenótipo da doença. Um homem herda seu cromossomo X da mãe, enquanto o pai transmite o cromossomo Y.

CAPÍTULO 4
Genética e biotecnologia na atualidade

Questões para exercitar o pensamento

8. Os estudantes deverão ser orientados a pesquisar, em diversas fontes (jornais, revistas, livros, internet etc.), aspectos da polêmica que envolve a produção de organismos transgênicos. É possível que eles abordem em seus textos argumentos científicos, religiosos, éticos e emocionais, entre outros. Nos endereços eletrônicos (acessos em: abr. 2016), há informações que podem ajudar nas discussões em sala de aula: <http://cienciahoje.uol.com.br/categorias?listasubject=Transg%C3%AAnicos>, <www.terra.com.br/reporterterra/transgenicos/contrarios.htm> e <http://revistaepoca.globo.com/Epoca/0,6993,EPT474558-1655,00.html>.

Uma sugestão é propor um debate em sala de aula para que haja troca de informações entre os estudantes. Nesse momento, é essencial garantir o respeito às diferentes opiniões e argumentos, mesmo que eles não sejam considerados científicos. A atividade permite que os estudantes treinem a habilidade de redigir textos dissertativos e, portanto, possibilita a interdisciplinaridade com Língua Portuguesa.

9. a) Resposta pessoal. Os estudantes poderão apontar as formas como os segmentos de DNA são obtidos e inseridos em outros organismos. Então, é possível citar o uso de endonucleases de restrição, os plasmídios recombinantes e os bacteriófagos (vetores de clonagem), por exemplo.

b) Resposta pessoal. As respostas podem indicar, por exemplo, que a comparação com um *software* reforça a ideia de que o material introduzido contém informações que executarão tarefas nos organismos que o receberam. Esse tipo de comparação entre a Genética e a informática é comum porque ambas utilizam linguagem codificada para armazenagem de dados e execução de ações. Além disso, analogias costumam empregar referências conhecidas e, como a informática está cada vez mais presente no dia a dia das pessoas, pode ser considerada uma referência.

Faça você mesmo!

10. A atividade possibilita aos estudantes vivenciar uma situação em que conhecimentos e técnicas da Biologia são essenciais. Ao fazer essa correlação com a vida real, a atividade incentiva o interesse dos alunos pela disciplina.

É necessário providenciar previamente os materiais que serão empregados, como fotocópia das páginas, tesouras e lápis. As questões podem ser respondidas individualmente ou em duplas, e a correção pode ser feita coletivamente, estimulando que os próprios estudantes expliquem uns aos outros, sanando suas dúvidas. Ao analisar os padrões obtidos na eletroforese, espera-se que os estudantes desvendem que o criminoso (questão **a**) e o pai da criança (questão **b**) são, respectivamente, os indivíduos P2 e P1.

A Biologia no vestibular e no Enem

9. **a)** A produção de DNA recombinante em bactérias consiste no corte de DNA de plasmídios e na inserção de um fragmento de DNA codificante de interesse (a ser clonado). A molécula resultante, chamada plasmídio recombinante, é introduzida em bactérias e estas passam a transcrever e traduzir o gene inserido.

b) Pode-se utilizar a tecnologia do DNA recombinante para fazer com que bactérias produzam, através da clonagem molecular de genes humanos, produtos de interesse, como o hormônio de crescimento e a insulina. Essa tecnologia permite também a criação de organismos transgênicos, como plantas resistentes a algum pesticida e mais nutritivas.

10. **a)** Endonucleases de restrição são enzimas que cortam o DNA em locais específicos. Ligases são enzimas que permitem a união dos trechos cortados a outro segmento de DNA que será utilizado como vetor.

b) A tecnologia do DNA recombinante permite o isolamento de fragmentos de DNA (genes) de interesse, sua multiplicação em bactérias e sua inserção em organismos de espécies diferentes. Os organismos que recebem o DNA de outra espécie são chamados transgênicos.

c) Insulina, somatostatina e hormônio de crescimento são exemplos de substâncias humanas produzidas em bactérias pela tecnologia do DNA recombinante. A soja transgênica resistente a herbicidas e o milho Bt resistente a insetos-praga são outros exemplos.

11. **a)** A prova pertence ao suspeito S3 porque seus padrões de VNTR são idênticos.

b) Qualquer tecido do indivíduo que contenha células nucleadas, como sangue (leucócitos), fios de cabelo contendo bulbo capilar, fragmentos de unha contendo tecido epitelial, fragmentos de pele, saliva, sêmen (esperma) ou até objetos contendo resquícios de sangue.

c) Cada indivíduo apresenta um padrão típico de sequências repetitivas específicas ao longo de trechos da molécula de DNA, ou seja, indivíduos diferentes apresentam VNTRs diferentes. Praticamente não existem duas pessoas com o mesmo padrão de VNTR.

12. Se fosse utilizado DNA de mulher, a sequência de nucleotídios do cromossomo Y não seria determinada, pois as mulheres não possuem esse cromossomo. Os homens possuem todos os tipos de cromossomos de nossa espécie: os 22 autossomos e os dois cromossomos sexuais, X e Y.

MÓDULO 2 A EVOLUÇÃO BIOLÓGICA

CAPÍTULO 5

Os fundamentos da evolução biológica

Questões para exercitar o pensamento

11. As populações originais de cactos provavelmente eram plantas rasteiras, com flores próximas ao solo. Plantas arborescentes com flores elevadas do chão surgiam eventualmente, ao acaso. Nas ilhas em que existiam iguanas, as flores rasteiras eram comidas por esses animais, enquanto as plantas com flores altas não eram afetadas e deixavam mais descendentes, o que representava uma vantagem reprodutiva. Com o tempo, nessas ilhas restaram apenas os cactos altos, com flores distantes do solo. Nas ilhas em que não existiam iguanas, não houve esse tipo de seleção e preservou-se a população original, com predominância de indivíduos rasteiros.

12. Resposta pessoal. É preciso avaliar os folhetos elaborados pelos estudantes. O ponto principal é que eles tenham compreendido que na população de bactérias já existem aquelas que apresentam genes que lhes conferem resistência aos antibióticos. O uso do medicamento age selecionando as linhagens resistentes, que sobrevivem e se multiplicam, dando origem a indivíduos também resistentes. A linguagem usada no folheto deve ser simples e acessível ao público não especializado.

13. Após a primeira aplicação do inseticida, os insetos sobreviventes foram preferencialmente os portadores de alelos que conferem resistência à droga. Com isso, a frequência desses alelos aumentou na população, e a geração seguinte teve maior quantidade de indivíduos resistentes.

14. A atividade permite integração com a disciplina de Arte. A imagem da abertura do capítulo mostra a *Criação de Adão*, na qual Michelangelo retratou a criação do homem por Deus, comentada no livro bíblico Gênesis. Vale lembrar que a composição é artística e não literal. Na obra, o braço direito de Deus está esticado para transmitir o poder da vida de seu próprio dedo para Adão. As semelhanças entre as figuras de Deus e de Adão representam a ideia bíblica de que Deus criou o homem à sua imagem e semelhança. Michelangelo foi arquiteto, escultor, pintor e poeta. Ele se dedicou ao estudo da anatomia humana e seus desenhos contribuíram para o avanço da Fisiologia e da Medicina.

É possível perceber o seu conhecimento sobre a anatomia humana em várias de suas esculturas e pinturas. A seguir, listamos alguns *sites* com informações sobre Michelangelo que podem dar respaldo às discussões em sala de aula sobre a contribuição desse artista para as diversas áreas do conhecimento e sobre o significado da obra feita no teto da Capela Sistina: <http://www.sabercultural.com/template/especiais/CapelaSistinaTeto.html>, <http://guiadoestudante.abril.com.br/aventuras-historia/veja-detalhes-vida-michelangelo-sua-obra-renascentista-725415.shtml>, <http://mestres.folha.com.br/pintores/09/> (acessos em: abr. 2016).

15. Resposta pessoal. Recomendamos lembrar aos estudantes que religião e ciência não são mutuamente excludentes, apenas apresentam visões diferentes sobre determinados assuntos. A ciência baseia-se na observação de fatos e testes de hipóteses. A religião considera o sobrenatural para a explicação de alguns fatos. Não é pretendido rivalizar essas duas linhas de pensamento; queremos apenas mostrar aos estudantes as duas visões. A seguir, listamos alguns artigos que podem ajudar nas discussões em sala de aula: <http://super.abril.com.br/historia/teoria-da-evolucao-darwin-contra-ataca>, <http://ciencia.estadao.com.br/noticias/geral,para-bento-xvi-criacao-e-evolucao-nao-se-contradizem,220135>, <http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,serhumano-nao-e-fruto-do-acaso-diz-bento-xvi,710052,0.htm> e <http://www.farlei.net/extraterrestre.html> (acessos em: abr. 2016).

16. Em Matemática, progressão é uma sequência numérica regida por algum tipo de lei ou padrão bem definido. Em uma progressão aritmética, cada termo da sequência, a partir do segundo, é obtido pela adição do anterior a um valor constante chamado **razão da PA**. Em uma progressão geométrica, cada termo, a partir do segundo, é obtido pela multiplicação entre o anterior e um valor constante chamado **razão da PG**. Por meio da construção dos gráficos, observa-se que uma PG com primeiro termo e razão iguais aos de uma PA evolui (cresce ou decresce) muito mais rapidamente. Malthus afirmava que a produção de alimentos crescia a uma taxa bastante inferior à do crescimento populacional, assim como os termos de uma PA crescem em relação aos de uma PG com as mesmas condições iniciais. As previsões de Malthus não levaram em conta os fatores que limitam o crescimento populacional nem o desenvolvimento das técnicas de cultivo de alimentos.

17. Resposta pessoal. Há diversos exemplos que podem ser citados pelos estudantes. Os conhecimentos biológicos sobre a fotossíntese recebem apoio da Química para elucidar as reações químicas que acontecem nas diferentes etapas desse processo e da Física para explicar a absorção e refração da luz, por exemplo. O processo digestivo também conta com os conhecimentos de Química para explicar as reações envolvidas na digestão de cada nutriente. Os vários assuntos relacionados à Ecologia só são compreendidos em sua totalidade quando aliamos a conhecimentos das diferentes áreas, como Química, Física, Matemática e Geografia.

Faça você mesmo!

18. Modelo de fossilização I

a) O gesso representa os sedimentos que formam a rocha sedimentar.

b) Em ambientes lamacentos, como fundo de rios ou uma poça formada após uma chuva. Esses ambientes permitem que marcas fiquem impressas em sua superfície.

c) Essas impressões foram rapidamente soterradas por sedimentos, ficando a salvo da ação dos eventos naturais.

Modelo de fossilização II

a) Fossilização do tipo molde.

b) A erosão que ajudou a descobrir o fóssil na rocha sedimentar.

Modelo de fossilização III

a) É do tipo contramolde.

b) A argila representa os sedimentos que soterraram o organismo inicialmente. Já o gesso representa os diversos tipos de minerais que substituíram as substâncias orgânicas do cadáver ou do vestígio sepultados, formando o contramolde do organismo.

A Biologia no vestibular e no Enem

6. A adição do antibiótico causou a morte de grande parte da população inicial de bactérias. Entretanto, graças à variabilidade existente entre os organismos, algumas bactérias que já apresentavam resistência a essa droga sobreviveram e se multiplicaram, gerando uma população composta de bactérias resistentes. Novas aplicações do mesmo antibiótico não serão mais eficientes para reduzir essa população, que tende a crescer de acordo com os recursos disponíveis no meio.

CAPÍTULO 6

A origem de novas espécies e dos grandes grupos de seres vivos

Questões para exercitar o pensamento

7. Para que haja especiação, as populações devem permanecer reprodutivamente isoladas por algum tempo, até que se estabeleçam mecanismos que impeçam a livre troca de genes entre seus membros. As populações humanas estão cada vez menos isoladas entre si, de modo que é altamente improvável que possa ocorrer especiação no futuro; mesmo as diferenças gênicas existentes atualmente entre as populações humanas tendem a diminuir progressivamente e desaparecer no futuro.

8. Duas situações podem ocorrer: 1) os membros das duas populações não serão mais capazes de se cruzar e/ou produzir descendentes férteis, constituindo duas espécies distintas; 2) os membros das duas populações poderão se cruzar e produzir descendentes férteis, misturando seus patrimônios genéticos. Nesse caso, ainda não teria havido especiação, mas as populações poderiam já apresentar diferenças genéticas, sendo consideradas subespécies; essas diferenças tenderiam a desaparecer com o tempo devido a cruzamentos e mistura genética entre os membros das duas populações.

9. a) A justificativa é que *Drosophila pseudobscura* e *D. persimilis* só se cruzam em condições especiais de laboratório; na natureza, esses cruzamentos praticamente não ocorrem.

b) O isolamento reprodutivo entre as duas espécies é comportamental (ou etológico).

10. a) Além das inúmeras diferenças morfológicas que, por si só, justificam classificar leões e tigres como espécies diferentes, o cruzamento entre eles só ocorre em condições especiais de cativeiro e os híbridos são, em geral, estéreis.

b) Essas duas espécies apresentam isolamento reprodutivo do tipo comportamental e por esterilidade dos híbridos.

Faça você mesmo!

11. Essa atividade permite a integração com a disciplina de Geografia. Se julgar oportuno, combine previamente com o colega dessa disciplina uma maneira de explorar a atividade de forma conjunta. É preciso que os estudantes compreendam que, no início, existia apenas um grande bloco continental, chamado Pangeia. Um movimento de fragmentação iniciou a primeira separação entre as porções norte e sul de Pangeia, gerando Laurásia e Gondwana. A partir disso, teve origem a separação entre América do Norte e Eurásia, bem como a América do Sul da África e a Austrália da Antártida. A Índia, que estava ao sul de Gondwana, se desprendeu da África em direção ao sul da Ásia. O Oceano Atlântico se abriu e foram definidos os oceanos Índico e Pacífico. Foi há menos de 20 milhões de anos que os continentes se configuraram assim como os conhecemos atualmente. Informações e mapas podem ser obtidos no endereço eletrônico <http://rede.novaescolaclube.org.br/planos-de-aula/deriva-continental-e-formacao-dos-continentes> (acesso em: abr. 2016).

12. Estimular a produção de infográficos possibilita que os estudantes treinem a habilidade de síntese ao mesmo tempo que consolidam o conhecimento aprendido. No endereço eletrônico <http://especiais.ig.com.br/infograficos> (acesso em: fev. 2016), há diversos exemplos de infográficos. Se julgar oportuno, selecione e mostre alguns para que os estudantes tenham referências. A atividade permite a integração com a disciplina de Arte. Após a confecção dos infográficos, reserve um momento para que os grupos apresentem suas produções. Se houver possibilidade, exponha os infográficos para os demais membros da escola. Outra sugestão é, ao final do ano letivo, compilar e expor na escola os principais trabalhos desenvolvidos na disciplina. Assim, além de valorizar as produções dos estudantes, eles terão a oportunidade de rever os temas trabalhados e perceber o quanto aprenderam ao longo do ano.

A Biologia no vestibular e no Enem

8. a) Pode-se concluir que as populações A, B e D pertencem à mesma espécie. O fator inicial que pode ter originado as populações A, B, C e D foi o isolamento geográfico.

b) Espécies diferentes que habitam a mesma região geográfica são denominadas simpátricas. O cruzamento entre o jumento e a égua, por exemplo, produz a mula, animal estéril.

9. a) A sequência de fatos é III, I e II.

b) As diferenças genéticas observadas são o resultado de mutações, recombinações gênicas e seleção natural, responsável pela fixação das características adaptativas em diferentes condições ambientais.

c) O isolamento reprodutivo impede o fluxo gênico entre os indivíduos de espécies diferentes, mantendo sua identidade genética.

10. a) Na fecundação interna, os espermatozoides são depositados no órgão genital feminino, no qual podem se locomover protegidos da desidratação. O ovo adaptado ao ambiente terrestre protege o embrião contra a desidratação, permitindo a independência da água para a reprodução.

b) A alimentação do embrião é proporcionada pelo vitelo da vesícula vitelínica, enquanto os produtos da excreção são depositados na alantoide. O ovo adaptado ao ambiente terrestre, entre outras funções, protege o embrião contra a dessecação.

CAPÍTULO 7
Evolução humana

Questões para exercitar o pensamento

12. Resposta pessoal. É preciso orientar os estudantes na elaboração das perguntas a serem feitas aos entrevistados, de modo que não ofendam os preceitos religiosos individuais. Essa atividade tem como objetivo não só conhecer o que as pessoas pensam sobre a evolução da espécie humana, mas também mostrar a importância de respeitar a opinião alheia. Permite a integração com a disciplina de Matemática, ao calcular as porcentagens das respostas, e com a de Língua Portuguesa, na elaboração do texto argumentativo. O endereço eletrônico <http://ceticismo.net/2010/04/05/quase-60-dos-brasileiros-acreditam-na-teoria-da-evolucao-mas-em-deus-tambem> (acesso em: abr. 2016) traz informações sobre pesquisas realizadas no país com o número de pessoas que acreditam no evolucionismo.

Faça você mesmo!

13. A cada dia temos mais acesso a textos, reportagens e opiniões disponibilizados na internet. Porém, há informações que são publicadas sem serem previamente verificadas, há conteúdo que é replicado de uma fonte em outra, mas sofre alterações que prejudicam as informações originais e há, até, publicação de informações errôneas. Dessa forma, é importante garantir que as fontes pesquisadas pelos estudantes sejam confiáveis. Aproveite essa oportunidade para trabalhar com eles o que são fontes confiáveis e selecionem juntos exemplos de *sites* que poderão ser utilizados em trabalhos de ciências. Outro ponto importante a ser observado é a data de publicação. Quanto mais recente, melhor. Reportagens adicionais sobre o *Australopithecus afarensis* podem ser encontradas nos endereços eletrônicos <http://ib.usp.br/biologia/evolucaohumana/acervo-de-fotos/monos/category/32-australopithecus-afarensis.html> e <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/2012/03/paleontologia-com-o-pe-direito> (acessos em: abr. 2016). A elaboração do texto de divulgação científica permite a interdisciplinaridade com Língua Portuguesa.

MÓDULO 3 FUNDAMENTOS DA ECOLOGIA

CAPÍTULO 8
O fluxo de energia e ciclos da matéria na natureza

Questões para exercitar o pensamento

14. a) Sabendo que uma parte da energia captada na fotossíntese e armazenada na matéria orgânica é gasta pelo próprio organismo fotossintetizante para suprir suas necessidades básicas de sobrevivência, as áreas em verde mais claro representam esse gasto decorrente da respiração celular.

b) A totalidade da base da pirâmide corresponde à produtividade primária bruta (PPB). Se a porção mais escura corresponde à energia que de fato está disponível para o nível trófico seguinte, essa área é a produtividade primária líquida (PPL). Sabendo que PPL = PPB – R, as áreas em verde mais claro correspondem ao gasto energético dos produtores devido à respiração celular (R).

15. a) Se o coelho se exercitasse muito, ele gastaria mais energia. Logo, a área mais escura do gráfico diminuiria e as azuis mais claras aumentariam.

b) As áreas em azul mais claro representariam os gastos energéticos do coelho devido à respiração celular (R), e a área em azul mais escuro seria a produtividade secundária líquida (PSL).

16. As áreas amarelas representam a energia perdida na passagem de um nível trófico para outro.

17. Ao digerir parte dos microrganismos, o boi se comporta como um consumidor secundário.

Faça você mesmo!

18. O professor pode pedir aos estudantes que se organizem em grupos e pesquisem as respostas para as questões citadas na atividade. É possível obter as respostas para as questões propostas na atividade e informações adicionais sobre os manguezais nos endereços eletrônicos <http://200.144.182.150/cbm/index.php/pt/artigos-acesso-livre/76-o-manguezal-e-a-sua-fauna> e <http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=409> (acessos em: abr. 2016).

Incentive os estudantes a responderem às questões propostas. Após as respostas, inicia-se a produção do infográfico. Explique que a infografia é um recurso útil para transmitir informações de forma concisa e visualmente atraente. Muitas vezes mesclam imagens (ilustrações, fotos ou gráficos) com textos curtos.

Auxilie os estudantes a selecionar as informações centrais que devem estar presentes no infográfico. Saliente que os textos devem ser curtos e objetivos. As imagens do infográfico podem ser obtidas em jornais, revistas ou internet. Esse tipo de atividade permite integração com a disciplina de Arte. Se julgar oportuno, converse previamente com o colega dessa disciplina e proponha trabalhar em conjunto nessa atividade, auxiliando os estudantes em criações artísticas que representem os manguezais. Os infográficos poderão ser publicados no *site* da escola ou em um *blog* sobre meio ambiente.

A Biologia no vestibular e no Enem

5. a) Se as emissões de gás carbônico para a atmosfera continuarem aumentando, então a redução do fitoplâncton deverá resultar em aumento dos níveis desse gás no ambiente. Isso ocorre porque o fitoplâncton é um dos responsáveis pela absorção do gás carbônico no processo da fotossíntese.

b) A redução do fitoplâncton deve acarretar a diminuição da biomassa total, afetando também a de decompositores.

6. As plantas leguminosas possuem uma associação mutualística com bactérias nitrificantes, que atuam na reposição dos compostos nitrogenados no solo.

7. a) A maior produtividade deve ocorrer na área recém-desmatada, porque nessa região a taxa de nutrientes minerais do solo, inclusive o nitrato, é mais elevada, uma vez que ainda não ocorreram a erosão e a lixiviação.

b) O elemento químico fundamental para os seres vivos presente no nitrato (NO_3^{-2}) é o nitrogênio. Os átomos desse elemento são utilizados na síntese de compostos orgânicos nitrogenados, como as proteínas e os ácidos nucleicos (DNA e RNA).

8. a) Consumidor secundário e terciário.

b) Cinco.

c) Alimentando-se de ratos.

CAPÍTULO 9
A dinâmica das populações

Questões para exercitar o pensamento

7. a) Número de indivíduos em cada ano: 1) 140; 2) 211; 3) 312; 4) 433; 5) 453; 6) 449. Os estudantes devem ser orientados a construir um gráfico de linhas com esses dados (ordenadas = número de indivíduos; abscissas = tempo em anos).

b) Densidade populacional a cada ano (indivíduos por km^2): 1) 140; 2) 211; 3) 312; 4) 433; 5) 453; 6) 449. Os estudantes devem ser orientados a construir um gráfico de barras com esses dados.

c) Espera-se que os alunos percebam que, aparentemente, o tamanho da população se estabilizou. O fator mais provável para isso é a escassez de recursos do meio devido ao aumento populacional. Nos anos seguintes é provável que o número de indivíduos oscile em torno do mesmo valor observado no último ano, considerando-se que já se atingiu o número de indivíduos que o meio pode suportar.

Faça você mesmo!

8. Uma sugestão é que o professor visite o *site* do IBGE e navegue por ele antes do início da atividade, para que possa esclarecer eventuais dúvidas no momento em que os estudantes estejam fazendo a busca. Caso não seja possível realizar a visita ao *site*, pode-se utilizar as tabelas disponíveis nas páginas 350 a 352, nas *Páginas para reproduzir*.

A atividade permite a integração com as disciplinas de Matemática e Geografia. Os conhecimentos de matemática, por exemplo, podem auxiliar nos cálculos das porcentagens na conversão dos dados da tabela em gráfico de pizza, ou ainda na conversão dos números da tabela em barras gráficas proporcionais. Ressalte que os gráficos são representações gráficas que, muitas vezes, facilitam a interpretação das informações. Os conhecimentos de Geografia, por sua vez, podem auxiliar os estudantes na interpretação dos dados referentes às populações urbanas e rurais do país.

Uma sugestão é pedir aos estudantes que, após explorarem o *site* do IBGE, escolham outro fator como taxa de analfabetismo, domicílios com rede de água e esgoto, domicílios abastecidos por energia elétrica em cada região do Brasil etc. e usem os dados para elaboração de novos gráficos.

A Biologia no vestibular e no Enem

5. a) O crescimento da população de predadores nos pontos I, II e III pode estar diretamente relacionado com o aumento anterior do número de presas.

b) A população de herbívoros aumentaria inicialmente. Após determinado tempo, entraria em declínio devido a uma possível falta de alimento disponível ou a outra consequência da superpopulação.

CAPÍTULO 10

Relações ecológicas

Questões para exercitar o pensamento

6. A relação entre os insetos e as flores é um exemplo de mutualismo, pois ambas as espécies envolvidas têm benefícios mútuos. Quando o agente polinizador é altamente específico para a espécie vegetal, a associação entre as espécies torna-se essencial para a sobrevivência de ambas, podendo ser classificada como mutualismo obrigatório (simbiose). Quando não há tanta especificidade entre o agente polinizador e a espécie vegetal, ambos se beneficiam da associação, embora ela não seja obrigatória, sendo classificada como protocooperação (mutualismo facultativo).

7. a) Parasitismo, pois a broca (parasita) causa danos às árvores (hospedeiras).

b) Predação, pois os pica-paus (predadores) alimentam-se das brocas (presas).

c) A associação poderia ser classificada como protocooperação, pois os pica-paus beneficiam as árvores ao comer as brocas. As árvores, por sua vez, beneficiam os pica-paus porque lhes fornecem alimento (as brocas).

8. O objetivo é que os estudantes pesquisem a interação entre as formigas e os fungos e concluam que ambas as espécies se beneficiam dessa interação e dependem dela para sobreviver. Essa relação é, portanto, considerada um mutualismo: os fungos precisam das condições criadas pelas formigas para se desenvolver, e estas dependem dos fungos como alimento. Algumas perguntas podem orientar os estudantes na pesquisa: “Ambas as espécies são beneficiadas?”; “O que aconteceria com esses fungos se as formigas desistissem de cultivá-los?”; “O que aconteceria com as formigas se um fungicida eliminasse completamente essa espécie de fungo do formigueiro?” e “As espécies associadas de formiga e fungo seriam capazes de viver isoladas uma da outra?”

Nos endereços eletrônicos (acessos em: abr. 2016) <http://www.rc.unesp.br/ib/ceis/mundoleveduras/PDF%202008/08_2_formigas%20e%20fungos.pdf>, <www.youtube.com/watch?v=-DUHpqwqZZQ> e <www.youtube.com/watch?v=TV7tA3YpHKo>, há informações que podem ser úteis para a discussão em sala de aula. Os dois últimos *links* mostram vídeos sobre a biologia das saúvas.

As pesquisas podem ser feitas individualmente ou em grupo. É importante que os estudantes possam trocar e discutir informações a fim de classificar de forma mais coerente a relação entre as formigas e os fungos.

9. Estimule os estudantes a perceber as vantagens e possíveis desvantagens para as duas espécies, orientando-os a pensar sobre as seguintes questões: “As formigas sobreviveriam sem os pulgões?”; “Os pulgões sobreviveriam sem as formigas?”; “Alguma das espécies se sobrepõe à outra na relação?” e “Há dependência de alguma das espécies nessa relação?”

Espera-se que o estudante seja capaz de perceber que, na interação citada, as formigas oferecem proteção aos pulgões, enquanto eles lhes fornecem alimento. Pode-se, então, dizer que há reciprocidade, ou seja, ambas as espécies são beneficiadas nessa interação. Por esse ponto de vista, a relação entre as formigas e os pulgões pode ser considerada como mutualismo facultativo, ou protocooperação, uma vez que não há obrigatoriedade da interação entre as espécies, pois elas sobrevivem quando não estão associadas. Contudo, como as formigas passam a tratar os pulgões como rebanho, associando-os como produtores de açúcar e levando-os para o formigueiro, onde passam a cuidar da prole desses ofídeos para escravizá-los no futuro, alguns cientistas consideram essa relação como esclavagismo (ou sinfilia). É interessante que os estudantes conheçam a definição de esclavagismo: relação ecológica desarmônica que ocorre entre indivíduos que se beneficiam explorando as atividades, o trabalho ou os produtos produzidos por outros organismos (da mesma espécie ou não). O esclavagismo pode ser interespecífico ou intraespecífico.

10. a) **Gráfico** II. Comensalismo: a espécie B é claramente beneficiada com a associação e a espécie A não é afetada.

b) **Gráfico** I. Predação, pois a espécie B se desenvolve melhor quando associada à espécie A, que é claramente prejudicada.

c) **Gráfico** IV. Competição, pois as espécies apresentam crescimento menor quando reunidas do que quando separadas, indicando que competem por recursos do meio.

d) **Gráfico** III. Protocooperação, pois ambas as espécies apresentam melhor desenvolvimento quando associadas, embora a associação não seja obrigatória.

A atividade possibilita que os estudantes revejam os conceitos de competição, predação, protocooperação e comensalismo. O objetivo é avaliar se os alunos são capazes de relacionar esses conceitos com os dados apresentados nos gráficos, logo, vale a pena estimular a discussão e a troca de conhecimentos e opiniões entre eles. Aproveite a oportunidade para desfazer eventuais dúvidas que possam surgir em relação a esse assunto.

A Biologia no vestibular e no Enem

3. a) Os predadores contribuem para a manutenção do equilíbrio populacional das presas, evitando a exaustão dos recursos ambientais, além de selecionar os indivíduos mais aptos.

b) Os herbívoros que devoram sementes podem ser considerados predadores, pois causam a morte precoce dos embriões do vegetal. Os comedores de folhas se utilizam de parte do vegetal, sem causar necessariamente a morte deste e, nesse caso, poderiam ser considerados parasitas dos vegetais.

4. a) Mutualismo ou simbiose.

b) As bactérias fixam o nitrogênio do ar, facilitando sua absorção pelas plantas. Já as células vegetais fornecem às bactérias substâncias orgânicas produzidas a partir da fotossíntese. Os dois indivíduos associados se beneficiam da relação, que é fundamental para a sobrevivência de ambos.

CAPÍTULO 11

Sucessão ecológica e biomas

Questões para exercitar o pensamento

17. Na elaboração do texto ou do diagrama, o estudante deverá levar em conta que:

a) a biomassa aumenta, pois ocorre aumento da quantidade de nutrientes e de matéria orgânica, o que torna as teias alimentares mais complexas, com o maior número de seres vivos;

b) a diversidade de espécies aumenta, pois passam a existir novos nichos ecológicos, que poderão ser ocupados por espécies diferentes, provenientes de outras regiões;

c) o número de nichos ecológicos aumenta ao longo dos diferentes estágios de sucessão, em decorrência das modificações no microclima, à medida que se estabelecem novos organismos;

d) a dependência do microclima em relação ao clima regional diminui; devido à ação dos organismos, o microclima torna-se cada vez mais independente do clima regional.

18. É preciso incentivar os alunos no compartilhamento de suas experiências pessoais e na descrição das paisagens com as quais já tiveram contato, com o propósito de rever as principais características dos domínios morfoclimáticos e biomas brasileiros.

19. A atividade pode ser realizada em grupos. O professor deve pedir aos estudantes que pesquisem sobre a relação das populações humanas com os manguezais, identificando ações de uso e conservação dos manguezais e os impactos causados pelas atividades antrópicas nesses ecossistemas. Aproveite a oportunidade para discutir os conceitos de extrativismo, sustentabilidade e desequilíbrio ambiental.

Se julgar apropriado, essa atividade pode ser feita em colaboração com o professor de Geografia.

Os manguezais são importantes áreas de fornecimento de nutrientes para a comunidade marinha costeira devido à intensa atividade microbiana aeróbia e anaeróbia. Por serem essenciais no ciclo de vida de um grande número de espécies de invertebrados, como caranguejos e siris, e vertebrados, como peixes e aves, essas áreas são consideradas verdadeiros “berçários”, com condições ideais para a reprodução e o início do desenvolvimento de várias espécies. As raízes das plantas do manguezal também ajudam a estabilizar o solo, diminuindo a erosão da faixa costeira. Os manguezais também são importantes como fonte de alimento e renda para as populações humanas.

Entre as atividades econômicas desenvolvidas nos manguezais estão: a coleta de mariscos variados, como sururu e ostras; a pesca; a coleta de caranguejos e siris e a extração de madeira. A relação estreita entre as populações humanas e os manguezais pode ser observada na música, em diversas canções, tendo originado até um ritmo característico, denominado “manguebeat”. Atualmente, a especulação imobiliária, a construção de portos e de outras obras de infraestrutura e a criação de camarões em grande escala vêm destruindo as áreas de manguezais. A poluição gerada por despejos de indústrias e residências na região também prejudicam os mangues locais. Devido à sua grande relevância, os manguezais são objeto de pesquisas acadêmicas, projetos e ações de conservação, realizados por universidades, instituições do governo e organizações não governamentais. Nos endereços eletrônicos <www.manguevivo.org.br/projetos.html> e <http://www.escolamangue.org/> (acessos em: fev. 2016), há informações úteis para dar respaldo às discussões em sala de aula.

Faça você mesmo!

20. Peça que, além das características biológicas, os estudantes pesquisem características socioculturais e econômicas dos biomas do Brasil. Uma sugestão é que, antes do início da atividade, o professor defina, com os estudantes, qual a forma de apresentação dos resultados da pesquisa.

Estimule a curiosidade dos estudantes levantando algumas questões: "Vocês acham que as características biológicas influenciam nos aspectos socioculturais e econômicos de determinada região?" e "Como as características socioculturais e econômicas de uma região podem influenciar no bioma local?"

Incentive os estudantes a refletir sobre o progresso de determinada região com base nos recursos que ela oferece para a população local e como a ocupação humana interfere no equilíbrio ecológico da região. Incentive-os, sempre que possível, a citar ações que geram riqueza sem afetar o meio ambiente.

A Biologia no vestibular e no Enem

2. a) Espécie W: floresta pluvial costeira (mata atlântica). Espécie Z: caatinga.

b) Espécie W: chuvas frequentes e alta temperatura. Espécie Z: seca ou pouca chuva, alta temperatura e muito vento.

3. a) Sucessão ecológica primária é o estabelecimento de uma comunidade em um ambiente antes desabitado. São exemplos a formação de vegetação sobre rochas nuas ou sobre lavas solidificadas de vulcões. Sucessão secundária é aquela que ocorre em áreas que já foram ocupadas por uma comunidade biológica e que foram devastadas naturalmente ou por atividade humana. Esse tipo de sucessão ocorre em lavouras abandonadas, florestas derrubadas ou em áreas cuja vegetação foi queimada.

b) Comunidade clímax é o nome dado ao estágio final de sucessão ecológica. Esse estágio é condicionado pelas condições físicas e climáticas do local.

CAPÍTULO 12
A humanidade e o ambiente

Questões para exercitar o pensamento

8. Espera-se que os estudantes relacionem o aumento da poluição nos meses de inverno ao fenômeno da inversão térmica, que impede a dispersão dos poluentes.

9. A oxigenação da água poderia compensar a falta de gás oxigênio dissolvido, causada pela atividade dos microrganismos que degradam a matéria orgânica.

Faça você mesmo!

10. O objetivo da atividade é que os estudantes compreendam o conceito de sustentabilidade e a importância e a necessidade de atitudes sustentáveis para garantir o futuro das gerações seguintes. Incentive os estudantes a buscar exemplos de ações sustentáveis atuais e, depois da pesquisa, proponha uma conversa em sala de aula para discutir o tema e permitir que eles compartilhem as informações obtidas. Incentive-os a refletir quais ações podem ser feitas de forma individual, em casa ou na escola. Leve-os a refletir quais ações podem ser extrapoladas para a comunidade e para o município. Os painéis podem ser expostos para a escola e até mesmo para a comunidade.

Em suas pesquisas, os estudantes poderão encontrar diversas ações que visam à sustentabilidade e que podem ser realizadas em diferentes escalas, em ambientes distintos e envolvendo atores diversos.

Com relação à escala, as ações podem ser: locais, como em uma comunidade ou escola; regionais, em uma cidade ou bacia hidrográfica, e internacionais, quando envolvem mais de um país. As ações podem ocorrer em ambientes rurais ou urbanos e podem ser realizadas por diferentes atores, como: um único cidadão, transformando sua residência ou suas práticas de consumo; um grupo de cidadãos; uma empresa, que desenvolva projetos socioambientais e trabalhe a cadeia produtiva de forma diferenciada; um grupo de empresas que, unidas, financiam e estimulam ações sustentáveis; ou governos. A seguir listamos alguns *sites* para consulta:

- Sebrae, Centro de Sustentabilidade. Disponível em: <www.sustentabilidade.sebrae.com.br/Sustentabilidade/Pr%C3%A1ticas-sustent%C3%A1veis>.
- Fórum Amazônia Sustentável. Disponível em: <www.forumamazoniasustentavel.org.br>.
- Instituto Akatu. Disponível em: <www.akatu.org.br>.

Acessos em: abr. 2016.

11. Para a realização da atividade o professor pode pedir que os estudantes se dividam em grupos e criem uma lista sobre o que poderia ser feito na escola ou comunidade para que os resíduos sólidos sejam reaproveitados ou reciclados. É possível propor que os estudantes concretizem a campanha de conscientização sobre a problemática do lixo em suas casas, na comunidade e na escola. Isso pode ser feito por meio da elaboração de materiais informativos que expliquem o que pode ou não ser reciclado ou a melhor forma de reaproveitar o lixo produzido. Cada grupo pode ficar responsável por abordar um tipo de material: plástico, vidro, papel, matéria orgânica, pilhas e baterias etc. Incentive os estudantes a colocar em ação o plano da coleta seletiva em locais em que ela não ocorra. Uma sugestão é que busquem saber se onde moram há empresas que coletam o lixo reciclável ou mesmo conhecer como funciona uma cooperativa de reciclagem. Os resultados da campanha podem ser publicados no *blog* da escola ou nas redes sociais.

É importante lembrar aos estudantes que, além de separar o lixo adequadamente e encaminhá-lo para a reciclagem, uma ação essencial e anterior a isso é reduzir a produção de lixo, o que pode ser feito por meio do consumo consciente.

Diversos materiais podem ser encaminhados para a reciclagem, como plásticos, alumínio, papéis e papelões, caixas Tetra Pak, vidros, óleo de cozinha usado e materiais eletrônicos. Os locais que realizam a coleta variam em cada município, é importante incentivar os estudantes a pesquisar os locais mais próximos de suas residências ou da escola. Em alguns casos, o lixo pode virar fonte de renda para catadores ou para a sociedade civil organizada. Em Curitiba, há um museu de objetos descartados no lixo.

O lixo orgânico, formado por restos de alimentos, também pode ser descartado de maneira mais adequada. Os restos orgânicos podem ser despejados em composteiras, onde serão decompostos, originando adubo. Este, por sua vez, poderá ser usado como fertilizante natural em hortas e plantações. Há diversos tipos e modelos de composteiras, inclusive aquelas que podem ser feitas em apartamentos. As composteiras que usam minhocas são também conhecidas como minhocários.

A seguir, listamos algumas sugestões de *sites* para consulta, com informações úteis para dar maior respaldo às discussões sobre reciclagem em sala de aula:

- Arte e reciclagem. Disponível em : <www.youtube.com/watch?v=G2D9uYBTRRU>.
- Compostagem doméstica (revista *Superinteressante*). Disponível em: <http://super.abril.com.br/blogs/ideias-verdes/tag/compostagem-domestica>.
- Composteiras domésticas (vídeo). Disponível em: <www.youtube.com/watch?v=-UWuaFJJVlo>.
- Iniciativas buscam aumentar a reciclagem de lixo (reportagem da Band News). Disponível em: <http://mais.uol.com.br/view/99at89ajv6h1/iniciativas-buscam-aumentar-reciclagem-do-lixo-04029A3472D0915326?types=A>.
- Minhocários domésticos. Disponível em: <www.moradadafloresta.org.br/produtos-principal/minhocarios-domesticos>.
- Reciclagem de lixo em Curitiba. Vimeo. Disponível em: <http://vimeo.com/channels/303077>.

Acessos em: abr. 2016.

A Biologia no vestibular e no Enem

3. **a)** Como os nitratos e fosfatos estão presentes nos dejetos orgânicos do esgoto doméstico, seu aumento tem relação direta com o aumento de esgotos de origem orgânica, que constituem a maior parte dos esgotos de origem doméstica. Os teores de clorofila indicam a presença de organismos fotossintetizantes (ou algas), que se desenvolvem com o aumento de nutrientes. Assim, quanto maior for o teor de clorofila, maior será a quantidade de organismos fotossintetizantes. O teor de oxigênio dissolvido está relacionado com a presença de organismos fotossintetizantes e também com a presença de organismos aeróbios. Estes últimos proliferam rapidamente em função do aumento de fosfatos e nitratos (ou nutrientes), consumindo muito oxigênio e provocando a desoxigenação da água. Como resultado final do processo, os peixes presentes morrem devido à falta de oxigênio dissolvido provocada pela eutrofização.

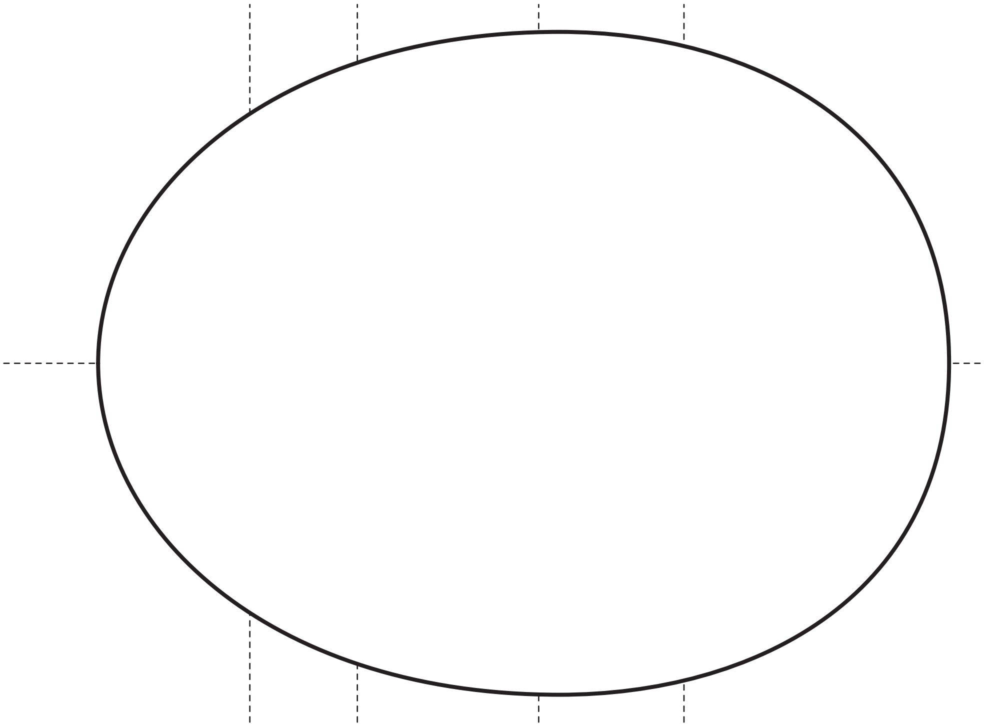
b) Com a instalação da estação de tratamento, os teores de fosfatos e nitratos começaram a diminuir, os da clorofila se estabilizaram e os de O_2 dissolvido voltaram a aumentar. Os valores se aproximaram das medidas iniciais.

Páginas para reproduzir

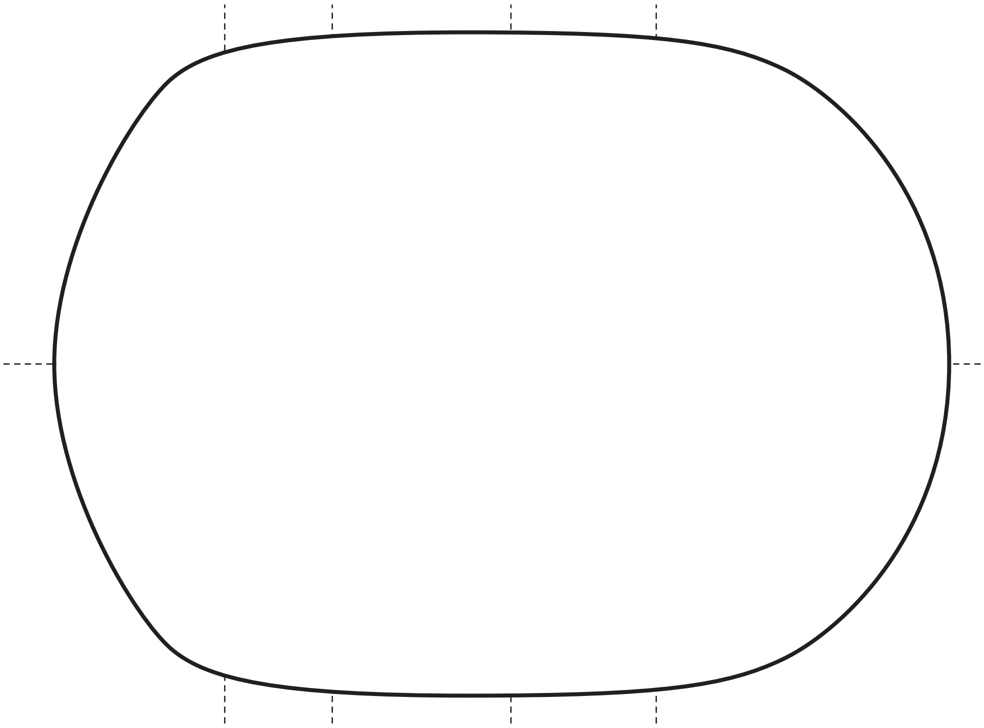
MODELOS PARA A ATIVIDADE 1 DA SEÇÃO “ATIVIDADES COMPLEMENTARES” DESTE **SUPLEMENTO**

Característica **Forma do rosto**

OVAL ***QQ*** ou ***Qq***



QUADRADO ***qq***

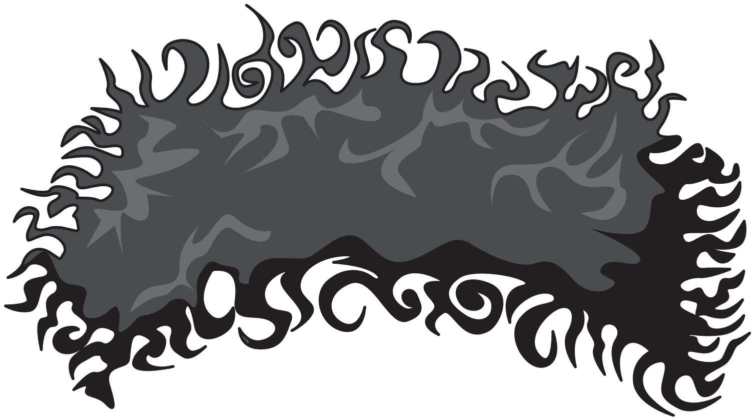


ADILSON SECCO

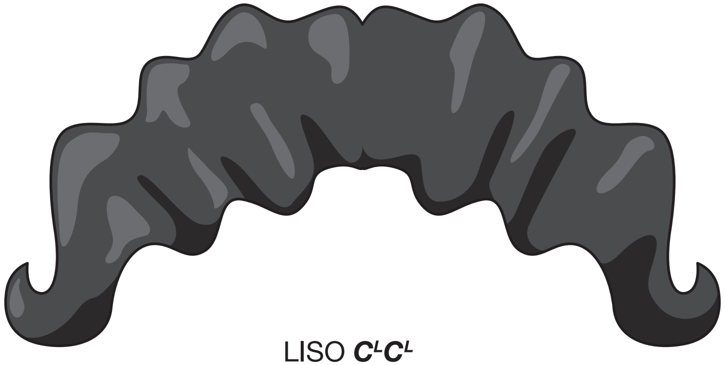
ILUSTRAÇÕES: ADILSON SECCO

Característica **Tipo de cabelo**

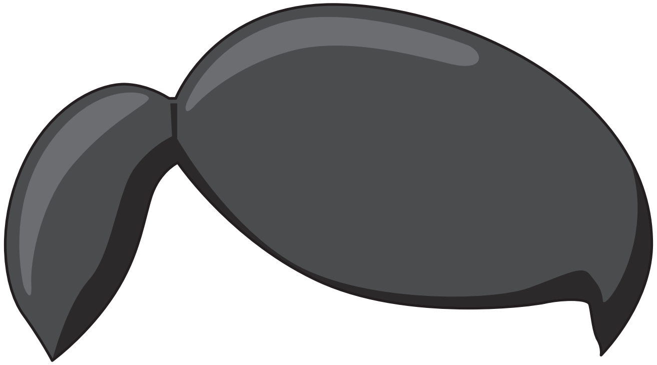
CRESPO C^cC^c



ONDULADO C^cC^L

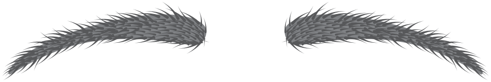


LISO C^LC^L



Característica **Espessura da sobrancelha**

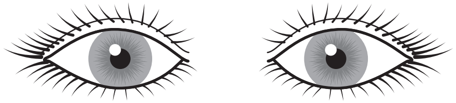
GROSSA EE ou Ee



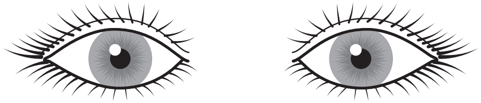
ESTREITA ee

Característica **Espaço entre os olhos**

JUNTOS O^JO^J



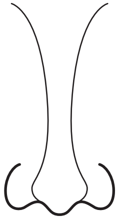
MÉDIOS O^JO^S



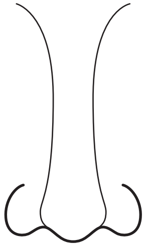
SEPARADOS O^SO^S

Característica **Largura do nariz**

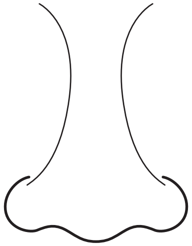
ESTREITO N^EN^E



MÉDIO N^EN^L

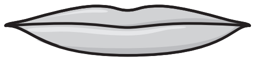


LARGO N^LN^L

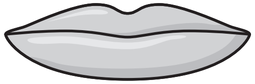


Característica **Espessura dos lábios**

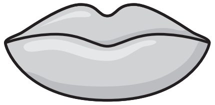
FINOS L^FL^F



MÉDIOS L^FL^G

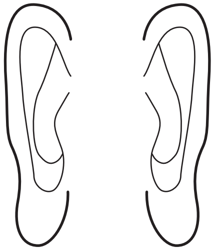


GROSSOS L^GL^G

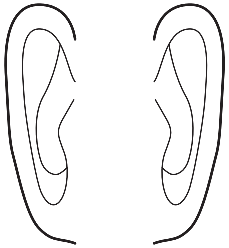


Característica **Forma do lobo da orelha**

LIVRE AA ou Aa



ADERENTE aa



MODELO PARA A ATIVIDADE 3 DA SEÇÃO “ATIVIDADES COMPLEMENTARES” DESTE **SUPLEMENTO**

Modelo de anuário do tempo geológico

JANEIRO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
1	2	3	4	5	6	**7**
8	9	10	11	12	13	**14**
15	16	17	18	19	20	**21**
22	23	24	25	26	27	**28**
29	30	31				

Origem da Terra

4,6 bilhões

FEVEREIRO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
			1	2	3	**4**
5	6	7	8	9	10	**11**
12	13	14	15	16	17	**18**
19	20	21	22	23	24	**25**
26	27	28	29			

MARÇO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
				1	2	**3**
4	5	6	7	8	9	**10**
11	12	13	14	15	16	**17**
18	19	20	21	22	23	**24**
25	26	27	28	29	30	**31**

Primeiros vestígios de seres vivos

3,5 bilhões

ABRIL

S	T	Q	Q	S	S	**D**
1	2	3	4	5	6	**7**
8	9	10	11	12	13	**14**
15	16	17	18	19	20	**21**
22	23	24	25	26	27	**28**
29	30					

MAIO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
		1	2	3	4	**5**
6	7	8	9	10	11	**12**
13	14	15	16	17	18	**19**
20	21	22	23	24	25	**26**
27	28	29	30	31		

JUNHO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
					1	**2**
3	4	5	6	7	8	**9**
10	11	12	13	14	15	**16**
17	18	19	20	21	22	**23**
24	25	26	27	28	29	**30**

JULHO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
1	2	3	4	5	6	**7**
8	9	10	11	12	13	**14**
15	16	17	18	19	20	**21**
22	23	24	25	26	27	**28**
29	30	31				

AGOSTO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
			1	2	3	**4**
5	6	7	8	9	10	**11**
12	13	14	15	16	17	**18**
19	20	21	22	23	24	**25**
26	27	28	29	30	31	

SETEMBRO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
						1
2	3	4	5	6	7	**8**
9	10	11	12	13	14	**15**
16	17	18	19	20	21	**22**
23	24	25	26	27	28	**29**
30						

OUTUBRO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
	1	2	3	4	5	**6**
7	8	9	10	11	12	**13**
14	15	16	17	18	19	**20**
21	22	23	24	25	26	**27**
28	29	30	31			

NOVEMBRO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
				1	2	**3**
4	5	6	7	8	9	**10**
11	12	13	14	15	16	**17**
18	19	20	21	22	23	**24**
25	26	27	28	29	30	

DEZEMBRO

S	T	Q	Q	S	S	**D**
						1
2	3	4	5	6	7	**8**
9	10	11	12	13	14	**15**
16	17	18	19	20	21	**22**
23	24	25	26	27	28	**29**
30	31					

ADILSON SECCO

TABELAS PARA A ATIVIDADE 8 DA SEÇÃO “FAÇA VOCÊ MESMO!” DO CAPÍTULO 9

Tabela 1: População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo os grupos de idade – Brasil – 2000

Grupos de idade	População residente								
	Total	Homens	Mulheres	Situação do domicílio e sexo					
				Urbana			Rural		
				Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres
Total	**169 799 170**	**83 576 015**	**86 223 155**	**137 953 959**	**66 882 993**	**71 070 966**	**31 845 211**	**16 693 022**	**15 152 189**
0 a 4 anos	16 375 728	8 326 926	8 048 802	12 760 820	6 490 364	6 270 456	3 614 908	1 836 562	1 778 346
Menos de 1 ano	3 213 310	1 635 916	1 577 394	2 518 464	1 282 941	1 235 523	694 846	352 975	341 871
1 ano	3 191 309	1 625 584	1 565 725	2 500 857	1 273 877	1 226 980	690 452	351 707	338 745
2 anos	3 282 937	1 667 436	1 615 501	2 554 405	1 298 025	1 256 380	728 532	369 411	359 121
3 anos	3 332 660	1 691 314	1 641 346	2 586 800	1 313 534	1 273 266	745 860	377 780	368 080
4 anos	3 355 512	1 706 676	1 648 836	2 600 294	1 321 987	1 278 307	755 218	384 689	370 529
5 a 9 anos	16 542 327	8 402 353	8 139 974	12 821 519	6 500 814	6 320 705	3 720 808	1 901 539	1 819 269
5 anos	3 445 580	1 752 832	1 692 748	2 665 738	1 354 129	1 311 609	779 842	398 703	381 139
6 anos	3 320 105	1 684 797	1 635 308	2 583 546	1 309 541	1 274 005	736 559	375 256	361 303
7 anos	3 300 664	1 676 334	1 624 330	2 557 439	1 297 341	1 260 098	743 225	378 993	364 232
8 anos	3 245 677	1 650 989	1 594 688	2 510 334	1 273 999	1 236 335	735 343	376 990	358 353
9 anos	3 230 301	1 637 401	1 592 900	2 504 462	1 265 804	1 238 658	725 839	371 597	354 242
10 a 14 anos	17 348 067	8 777 639	8 570 428	13 530 190	6 803 898	6 726 292	3 817 877	1 973 741	1 844 136
10 anos	3 367 200	1 712 684	1 654 516	2 603 210	1 318 951	1 284 259	763 990	393 733	370 257
11 anos	3 433 809	1 740 694	1 693 115	2 677 313	1 350 838	1 326 475	756 496	389 856	366 640
12 anos	3 524 814	1 784 687	1 740 127	2 747 860	1 382 386	1 365 474	776 954	402 301	374 653
13 anos	3 461 413	1 744 476	1 716 937	2 708 922	1 356 612	1 352 310	752 491	387 864	364 627
14 anos	3 560 831	1 795 098	1 765 733	2 792 885	1 395 111	1 397 774	767 946	399 987	367 959
15 a 19 anos	17 939 815	9 019 130	8 920 685	14 403 539	7 132 822	7 270 717	3 536 276	1 886 308	1 649 968
15 anos	3 521 881	1 769 166	1 752 715	2 767 637	1 374 707	1 392 930	754 244	394 459	359 785
16 anos	3 497 668	1 757 499	1 740 169	2 779 060	1 376 850	1 402 210	718 608	380 649	337 959
17 anos	3 682 950	1 852 317	1 830 633	2 956 922	1 463 643	1 493 279	726 028	388 674	337 354
18 anos	3 751 494	1 893 240	1 858 254	3 042 327	1 508 601	1 533 726	709 167	384 639	324 528
19 anos	3 485 822	1 746 908	1 738 914	2 857 593	1 409 021	1 448 572	628 229	337 887	290 342
20 a 24 anos	16 141 515	8 048 218	8 093 297	13 352 132	6 549 365	6 802 767	2 789 383	1 498 853	1 290 530
20 anos	3 508 846	1 752 773	1 756 073	2 874 807	1 411 721	1 463 086	634 039	341 052	292 987
21 anos	3 268 804	1 630 551	1 638 253	2 711 066	1 330 452	1 380 614	557 738	300 099	257 639
22 anos	3 265 973	1 632 180	1 633 793	2 698 889	1 326 049	1 372 840	567 084	306 131	260 953
23 anos	3 104 791	1 546 528	1 558 263	2 577 141	1 263 070	1 314 071	527 650	283 458	244 192
24 anos	2 993 101	1 486 186	1 506 915	2 490 229	1 218 073	1 272 156	502 872	268 113	234 759
25 a 29 anos	13 849 665	6 814 328	7 035 337	11 570 969	5 606 425	5 964 544	2 278 696	1 207 903	1 070 793
30 a 34 anos	13 028 944	6 363 983	6 664 961	10 918 396	5 248 443	5 669 953	2 110 548	1 115 540	995 008

Grupos de idade	População residente								
	Total	Homens	Mulheres	Situação do domicílio e sexo					
				Urbana			Rural		
				Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres
35 a 39 anos	12 261 529	5 955 875	6 305 654	10 326 271	4 929 130	5 397 141	1 935 258	1 026 745	908 513
40 a 44 anos	10 546 694	5 116 439	5 430 255	8 913 019	4 249 804	4 663 215	1 633 675	866 635	767 040
45 a 49 anos	8 721 541	4 216 418	4 505 123	7 309 621	3 472 375	3 837 246	1 411 920	744 043	667 877
50 a 54 anos	7 062 601	3 415 678	3 646 923	5 833 659	2 764 708	3 068 951	1 228 942	650 970	577 972
55 a 59 anos	5 444 715	2 585 244	2 859 471	4 387 995	2 032 135	2 355 860	1 056 720	553 109	503 611
60 a 64 anos	4 600 929	2 153 209	2 447 720	3 712 213	1 676 323	2 035 890	888 716	476 886	411 830
65 a 69 anos	3 581 106	1 639 325	1 941 781	2 916 899	1 284 812	1 632 087	664 207	354 513	309 694
70 a 74 anos	2 742 302	1 229 329	1 512 973	2 249 617	966 115	1 283 502	492 685	263 214	229 471
75 a 79 anos	1 779 587	780 571	999 016	1 456 665	610 767	845 898	322 922	169 804	153 118
80 a 84 anos	1 036 034	428 501	607 533	841 798	331 002	510 796	194 236	97 499	96 737
85 a 89 anos	534 871	208 088	326 783	436 121	160 379	275 742	98 750	47 709	51 041
90 a 94 anos	180 426	65 117	115 309	147 784	50 531	97 253	32 642	14 586	18 056
95 a 99 anos	56 198	19 221	36 977	45 682	14 899	30 783	10 516	4 322	6 194
100 anos ou mais	24 576	10 423	14 153	19 050	7 882	11 168	5 526	2 541	2 985

Fonte: IBGE, *Censo demográfico 2000*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/tabelabrasil111.shtm>. Acesso em: mar. 2016.

Tabela 2: População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo os grupos de idade – Brasil – 2010

Grupos de idade	População residente								
	Total	Homens	Mulheres	Situação do domicílio e sexo					
				Urbana			Rural		
				Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres
Total	**190 755 799**	**93 406 990**	**97 348 809**	**160 925 804**	**77 710 179**	**83 215 625**	**29 829 995**	**15 696 811**	**14 133 184**
0 a 4 anos	13 796 158	7 016 987	6 779 171	11 301 148	5 745 124	5 556 024	2 495 010	1 271 863	1 223 147
Menos de 1 ano	2 713 244	1 378 532	1 334 712	2 246 034	1 141 784	1 104 250	467 210	236 748	230 462
1 ano	2 694 909	1 369 425	1 325 484	2 217 676	1 126 489	1 091 187	477 233	242 936	234 297
2 anos	2 726 957	1 387 143	1 339 814	2 230 049	1 133 749	1 096 300	496 908	253 394	243 514
3 anos	2 790 782	1 419 295	1 371 487	2 274 677	1 156 130	1 118 547	516 105	263 165	252 940
4 anos	2 870 266	1 462 592	1 407 674	2 332 712	1 186 972	1 145 740	537 554	275 620	261 934
5 a 9 anos	14 969 375	7 624 144	7 345 231	12 135 285	6 169 531	5 965 754	2 834 090	1 454 613	1 379 477
5 anos	2 931 988	1 493 253	1 438 735	2 381 803	1 211 695	1 170 108	550 185	281 558	268 627
6 anos	2 894 419	1 472 635	1 421 784	2 349 036	1 193 318	1 155 718	545 383	279 317	266 066
7 anos	2 959 192	1 506 828	1 452 364	2 394 880	1 217 869	1 177 011	564 312	288 959	275 353
8 anos	2 995 612	1 528 003	1 467 609	2 422 432	1 232 734	1 189 698	573 180	295 269	277 911

Grupos de idade	População residente								
	Total	Homens	Mulheres	Situação do domicílio e sexo					
				Urbana			Rural		
				Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres
9 anos	3 188 164	1 623 425	1 564 739	2 587 134	1 313 915	1 273 219	601 030	309 510	291 520
10 a 14 anos	17 166 761	8 725 413	8 441 348	13 956 987	7 062 057	6 894 930	3 209 774	1 663 356	1 546 418
10 anos	3 505 216	1 793 146	1 712 070	2 844 121	1450 909	1 393 212	661 095	342 237	318 858
11 anos	3 352 844	1 709 291	1 643 553	2 731 862	1 386 683	1 345 179	620 982	322 608	298 374
12 anos	3 402 242	1 727 220	1 675 022	2 765 478	1 397 964	1 367 514	636 764	329 256	307 508
13 anos	3 412 748	1 728 588	1 684 160	2 774 748	1 399 281	1 375 467	638 000	329 307	308 693
14 anos	3 493 711	1 767 168	1 726 543	2 840 778	1 427 220	1 413 558	652 933	339 948	312 985
15 a 19 anos	16 990 872	8 558 868	8 432 004	14 039 001	6 998 102	7 040 899	2 951 871	1 560 766	1 391 105
15 anos	3 574 929	1 802 172	1 772 757	2 913 134	1 456 230	1 456 904	661 795	345 942	315 853
16 anos	3 410 704	1 719 415	1 691 289	2 800 800	1 398 165	1 402 635	609 904	321 250	288 654
17 anos	3 372 241	1 701 889	1 670 352	2 779 183	1 386 897	1 392 286	593 058	314 992	278 066
18 anos	3 367 172	1 699 061	1 668 111	2 801 550	1 397 096	1 404 454	565 622	301 965	263 657
19 anos	3 265 826	1 636 331	1 629 495	2 744 334	1 359 714	1 384 620	521 492	276 617	244 875
20 a 24 anos	17 245 192	8 630 229	8 614 963	14 706 068	7 276 963	7 429 105	2 539 124	1 353 266	1 185 858
20 anos	3 389 729	1 698 081	1 691 648	2 863 687	1 418 305	1 445 382	526 042	279 776	246 266
21 anos	3 421 736	1 713 268	1 708 468	2 916 244	1 444 621	1 471 623	505 492	268 647	236 845
22 anos	3 510 497	1 760 477	1 750 020	2 992 003	1 482 841	1 509 162	518 494	277 636	240 858
23 anos	3 420 254	1 709 675	1 710 579	2 927 520	1 446 578	1 480 942	492 734	263 097	229 637
24 anos	3 502 976	1 748 728	1 754 248	3 006 614	1 484 618	1 521 996	496 362	264 110	232 252
25 a 29 anos	17 104 414	8 460 995	8 643 419	14 772 957	7 225 732	7 547 225	2 331 457	1 235 263	1 096 194
30 a 34 anos	15 744 512	7 717 658	8 026 854	13 611 921	6 586 877	7 025 044	2 132 591	1 130 781	1 001 810
35 a 39 anos	13 888 579	6 766 664	7 121 915	11 975 407	5 750 498	6 224 909	1 913 172	1 016 166	897 006
40 a 44 anos	13 009 364	6 320 568	6 688 796	11 187 429	5 344 982	5 842 447	1 821 935	975 586	846 349
45 a 49 anos	11 833 352	5 692 014	6 141 338	10 181 394	4 806 322	5 375 072	1 651 958	885 692	766 266
50 a 54 anos	10 140 402	4 834 995	5 305 407	8 708 339	4 074 679	4 633 660	1 432 063	760 316	671 747
55 a 59 anos	8 276 221	3 902 344	4 373 877	7 025 474	3 238 531	3 786 943	1 250 747	663 813	586 934
60 a 64 anos	6 509 120	3 041 035	3 468 085	5 474 944	2 479 882	2 995 062	1 034 176	561 153	473 023
65 a 69 anos	4 840 810	2 224 065	2 616 745	4 040 016	1 792 798	2 247 218	800 794	431 267	369 527
70 a 74 anos	3 741 636	1 667 372	2 074 264	3 142 173	1 349 329	1 792 844	599 463	318 043	281 420
75 a 79 anos	2 563 447	1 090 517	1 472 930	2 174 038	889 908	1 284 130	389 409	200 609	188 800
80 a 84 anos	1 666 972	668 623	998 349	1 423 603	546 865	876 738	243 369	121 758	121 611
85 a 89 anos	819 483	310 759	508 724	695 385	251 112	444 273	124 098	59 647	64 451
90 a 94 anos	326 558	114 964	211 594	273 348	90 960	182 388	53 210	24 004	29 206
95 a 99 anos	98 335	31 529	66 806	81 121	24 365	56 756	17 214	7 164	10 050
100 anos ou mais	24 236	7 247	16 989	19 766	5 562	14 204	4 470	1 685	2 785

Fonte: IBGE, *Censo demográfico 2010*. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/tabelas_pdf/tab1.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

HINO NACIONAL

Letra: Joaquim Osório Duque Estrada

Música: Francisco Manuel da Silva

Ouviram do Ipiranga as margens plácidas
De um povo heroico o brado retumbante,
E o sol da liberdade, em raios fúlgidos,
Brilhou no céu da Pátria nesse instante.

Se o penhor dessa igualdade
Conseguimos conquistar com braço forte,
Em teu seio, ó liberdade,
Desafia o nosso peito a própria morte!

Ó Pátria amada,
Idolatrada,
Salve! Salve!

Brasil, um sonho intenso, um raio vívido
De amor e de esperança à terra desce,
Se em teu formoso céu, risonho e límpido,
A imagem do Cruzeiro resplandece.

Gigante pela própria natureza,
És belo, és forte, impávido colosso,
E o teu futuro espelha essa grandeza.

Terra adorada,
Entre outras mil,
És tu, Brasil,
Ó Pátria amada!

Dos filhos deste solo és mãe gentil,
Pátria amada,
Brasil!

Deitado eternamente em berço esplêndido,
Ao som do mar e à luz do céu profundo,
Fulguras, ó Brasil, florão da América,
Iluminado ao sol do Novo Mundo!

Do que a terra mais garrida
Teus risonhos, lindos campos têm mais flores;
"Nossos bosques têm mais vida",
"Nossa vida" no teu seio "mais amores".

Ó Pátria amada,
Idolatrada,
Salve! Salve!

Brasil, de amor eterno seja símbolo
O lábaro que ostentas estrelado,
E diga o verde-louro desta flâmula
- Paz no futuro e glória no passado.

Mas, se ergues da justiça a clava forte,
Verás que um filho teu não foge à luta,
Nem teme, quem te adora, a própria morte.

Terra adorada,
Entre outras mil,
És tu, Brasil,
Ó Pátria amada!

Dos filhos deste solo és mãe gentil,
Pátria amada,
Brasil!

De onde vem a nossa comida?

O sistema de produção e distribuição de alimentos pode promover justiça social e proteger o ambiente ou, ao contrário, gerar desigualdades sociais e ameaças aos recursos naturais e à biodiversidade. Precisamos buscar um sistema agroalimentar que não prejudique a vida das pessoas, nem o meio ambiente e nem a nossa saúde. A sustentabilidade também está nas escolhas que vão para a mesa!

Este livro didático é um **bem reutilizável** da escola e deve ser **devolvido em bom estado** ao final do ano para uso de outra pessoa no **próximo** período letivo.

ISBN 978-85-16-10525-9

FNDE MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

BRASIL GOVERNO FEDERAL

CÓDIGO DO LIVRO:
0196P18113103IM